دریافت: ۴ تیر ۹۵ پذیرش: ۱۵ شهریور ۹۵

# مطالعه مقایسه‌ای توابع هدف معمول برپایه پارامترهای مودال در شناسایی آسیب سازه‌ای

**احسان جمشیدی[1*]، بهرام جمشیدی[2]، فاطمه تقی خاکی[2]، علیرضا ارغوان[3]**

۱- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران
۳- مربی، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران
* سمنان، صندوق پستی ۱۷۹-۳۵۱۴۵، ehsan.jamshidi@semnan.ac.ir

**چکیده**

انتخاب تابع هدف مناسب برای تعیین محل آسیب و تخمین شدت آن در سازه امری ضروری می‌باشد. برای این منظور توابع هدف وابسته به پارامترهای مودال سازه از قبیل شکل مود و فرکانس طبیعی با توابع هدف دیگر که قادر به پیش‌بینی محل آسیب می‌باشند ترکیب می‌شوند. سپس به کمک روشهای بهینه سازی محل و شدت آسیب به دست می‌آید. در این مقاله با استفاده از روش المان محدود ابتدا یک تیر یک سرگیر دار در نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده و سپس الگوریتم ژنتیک تک و چندهدفه با استفاده از توابع هدف مختلف به دست آمده از پارامترهای مودال برای تعیین میزان و محل ترک بکار گرفته می‌شود. به منظور مقایسه توابع هدف مختلف اثر ناکاملی درجات آزادی اندازه گیری شده، محدوده فرکانسی اندازه گیری و همچنین نویز محیطی بر نتایج شناسایی آسیب مورد مطالعه قرار می گیرد.

**کلیدواژگان**

شناسایی آسیب، تابع هدف، فرکانس طبیعی، شکل مود، پارامترهای مودال، تیر یکسرگیردار

# A Comparative study of common objective functions based on modal parameters in structural damage detection

**Ehsan Jamshidi[1*], Bahram Jamshidi[2], Fatemeh Taghi Khaki[2], Alireza Arghavan[3]**

1- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran
3- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran
* P.O.B. 35145-179, Semnan, Iran, ehsan.jamshidi@semnan.ac.ir

**Abstract**

Choosing appropriate objective function is necessary for detection of damage location and severity. To this end, objective functions based on modal parameters such as mode shapes and natural frequencies are combined with other objective functions capable to detect damage location. Then the location and severity of damage is obtained using optimization techniques. In this paper a cantilever beam is simulated numerically in MATLAB software using finite element method and then single and multi-objective genetic algorithms with different objective functions based on modal parameters are used to detect damage location and severity. To compare different objective functions, the effect of coordinate incompleteness, frequency range of interest and also environmental noise on the obtained results is studied.

**Keywords**

Damage Detection, Objective function, Natural Frequency, Mode Shape, Modal Parameters, Cantilever Beam

## ۱- مقدمه

برای تعیین محل آسیب و تخمین شدت آن در سازه یافتن تابع هدف مناسب امری ضروری می‌باشد. برای این منظور توابع هدف وابسته به پارامترهای مودال سازه شکل مود و فرکانس طبیعی با توابع هدف دیگر که قادر به پیش‌بینی محل آسیب می‌باشند ترکیب می‌شوند. سپس به کمک روشهای بهینه سازی محل و شدت آسیب به دست می‌آید.

در این مقاله با استفاده از روش المان محدود ابتدا یک تیر یک سرگیر دار در نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده و سپس الگوریتم ژنتیک تک و چندهدفه با استفاده از توابع هدف مختلف به دست آمده از پارامترهای مودال برای تعیین میزان و محل ترک بکار گرفته می‌شود.

به منظور یافتن محل و تخمین شدت آسیب بر روی تیر یکسرگیردار با دو المان آسیب دیده، از روش الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. در ابتدا با الگوریتم ژنتیک ساده براساس تک تابع هدف به شناسایی آسیب پرداخته و سپس الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای تعیین میزان و محل آسیب مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور حل مسائل چندهدفه از دو روش، روش اول تبدیل مسئله چندهدفه به تک هدفه با وزن دهی به توابع هدف و روش دوم از مجموعه جواب های بهینه پارتو الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده می‌شود.

## ۲- ساخت مدل عددی

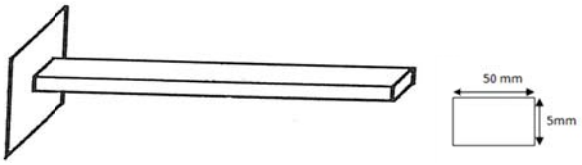
### ۲-۱- مدل کردن تیر یکسرگیردار

برای مدل کردن تیر از المان تیر[1] تیموشنکو استفاده شده است. این المان، المانی با دو گره است که هر گره دارای دو درجه آزادی می‌باشد. یک درجه آزادی جابجایی و دیگری دورانی است.

تیر مدل شده دارای ۱۰۰۰میلیمتر متر طول بوده و سطح مقطع آن به صورت مستطیلی به ابعاد ۵۰ میلیمتر در ۵ میلیمتر و از جنس فولاد با مدول

1 Beam element

یانگ ۲۰۰ گیگا پاسکال و چگالی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. طول تیر به ۶ المان تقسیم شده است. در اینجا تیر به صورت یکسرگیردار مدل شده است برای اعمال این شرط مرزی برروی مدل المان محدود کافیست که در محل سر گیردار تیر، سطر و ستون مربوط به درجه آزادی‌های جابجایی و دورانی را از ماتریس جرم وسختی حذف کنیم. پس از اعمال شرایط مرزی، مدل سازه برای تعیین فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها مورد استفاده قرار می‌گیرد.




**شکل ۱** شماتیک تیر مدل شده برای شبیه‌سازی

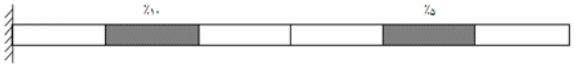
**۲-۲- مدل کردن ترک**

برای مدل کردن ترک در تیر از روش ارائه شده توسط ویلالبا [۱] استفاده شده است. در این روش ترک با کاهش مقدار سختی در ماتریس سختی تیر، مدل شده و ماتریس جرم بدون تغییر باقی می‌ماند. برای این منظور مدول الاستیسیته مربوط به المان آسیب دیده با مدول الاستیسیته رابطه ۱ جایگزین می شود.

$$\mathbf{E_{dj}} = \left(\mathbf{1} - \boldsymbol{\beta}_{\mathbf{j}}\right) \times \mathbf{E_j} \qquad (۱)$$

پارامترهای $\mathbf{E_{dj}}$ و $\mathbf{E_j}$ به ترتیب مدول الاستیسیته المان jام برای شرایط آسیب دیده و سالم هستند. $\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{j}}$ یک عامل کاهش مدول الاستیسیته با مقدار مساوی صفر برای المان سالم و مقدار مساوی یک برای حالت آسیب کامل است.

شکل ۲ نشان می‌دهد که تیر یکسرگیردار مورد بررسی دارای دو المان آسیب دیده می‌باشد. به منظور شبیه سازی آسیب، المان های دوم و پنجم تیر به ترتیب به میزان ۱۰ و ۵ درصد کاهش مدول الاستیسیته دارند.



**شکل ۲** تیر یکسرگیردار با دو المان آسیب دیده

## ۳- انتخاب توابع هدف و پارامترهای بهینه سازی

تابع هدف اختلاف بین مقادیر تجربی و عددی پارامترهای مودال از جمله فرکانس طبیعی، شکل مود و انعطاف پذیری و . . . می باشد. توابع هدف متداول بر پایه پارامترهای مودال بصورت زیر بیان می شوند [۲].

$$\mathbf{F_1} = \mathbf{1} - \mathbf{MACFLEX} \qquad (۲)$$

$$\mathbf{F_2} = \mathbf{1} - \mathbf{MTMAC} \qquad (۳)$$

$$\mathbf{F_3} = \sum_{\mathbf{j=1}}^{\mathbf{m}} \left( \frac{\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{num\ j}} - \boldsymbol{\omega}_{\mathbf{exp\ j}}}{\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{num\ j}}} \right)^{\mathbf{2}} \qquad (۴)$$

$$\mathbf{F_4} = \sum_{\mathbf{j=1}}^{\mathbf{m}} \left( \frac{\boldsymbol{\emptyset}_{\mathbf{num\ j}} - \boldsymbol{\emptyset}_{\mathbf{exp\ j}}}{\boldsymbol{\emptyset}_{\mathbf{num\ j}}} \right)^{\mathbf{2}} \qquad (۵)$$

$$\mathbf{F_5} = \left\| \mathbf{F_{exp}} - \mathbf{F_{num}} \right\|^{\mathbf{2}} \qquad (۶)$$

که در روابط ۱ تا ۴، MACFLEX ، معیار اطمینان انعطاف‌پذیری مودال، $\omega_{num}$ و $\omega_{exp}$ به ترتیب فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از مدل تحلیلی و تجربی، $\emptyset_{num}$ و $\emptyset_{exp}$ به ترتیب شکل مودهای طبیعی به دست آمده از مدل تحلیلی و تجربی و $F_{num}$ و $F_{exp}$ به ترتیب انعطاف پذیری به دست آمده از مدل تحلیلی و تجربی می‌باشد.

پارامترهای بهینه سازی برای تیر یکسرگیردار و الگوریتم ژنتیک مطابق جداول ۱ و ۲ در نظر گرفته می‌شود.

**جدول ۱** پارامترهای بهینه سازی برای تیر یکسرگیردار

| متغیر طراحی | شاخص آسیب ( d) |
|---|---|
| تعداد متغیر طراحی | ۶ |
| شرایط مرزی پایین( lb ) | ۰ |
| شرایط مرزی بالا( ub ) | ۰,۳ |

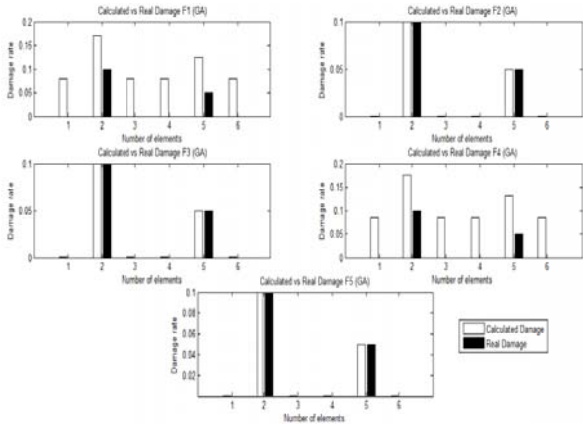
**جدول ۲** پارامتر های الگوریتم ژنتیک

| پارامترهای الگوریتم ژنتیک | مقادیر |
|---|---|
| تعداد جمعیت | ۱۰۰۰ |
| تعداد نسل ها | ۱۰۰۰ |
| تلرانس تابع هدف | $۱\times۱۰^{-۹}$ |

## ۴- نتایج شناسایی آسیب

**۴-۱- نتایج بهینه سازی تک هدفه با استفاده از داده های بدون نویز**

نتایج شناسایی آسیب برای حالت قرار دادن شتاب‌سنج برروی تمام المان ها و در نظر گرفتن تمام شکل مودهای تیر بدست آمده است که در شکل ۳ دیده می‌شود.




**شکل ۳** مقادیر واقعی و محاسبه شده آسیب با استفاده از توابع هدف F1,F2,F3,F4,F5

حساسیت شکل مود به آسیب های محلی ناچیز است و به طبیعت سازه نیز بستگی دارد. به عنوان نمونه، در یک خرپا بزرگ وپیچیده آسیب های محلی سبب تغییرهای زیادی در شکل مود می‌گردد. با وجود این، در یک تیر ترک خورده، این دگرگونی بسیار ناچیز می‌باشد [۳] . با توجه به نمودار فوق به کار گیری توابع هدف فقط براساس شکل مود برای تشخیص خسارت کافی نمی‌باشد. از سوی دیگر معیار MACFLEX تنها وقوع آسیب در تیر را نشان می‌دهد، اما میزان و محل صحیح آسیب را نمی تواند مشخص کند. توابع

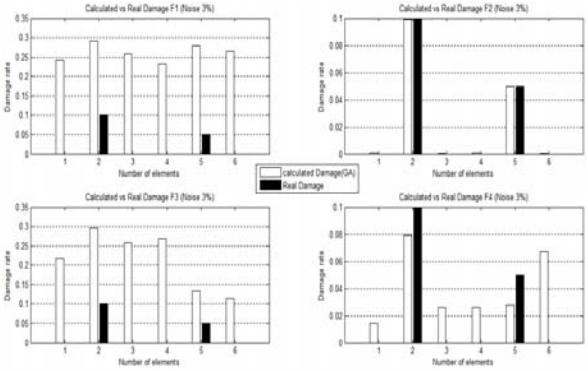
هدف براساس معیار MTMAC، فرکانس طبیعی و اختلاف انعطاف‌پذیری نشانه بارزتریی از محل و میزان آسیب در المان‌های تیر را می‌دهند و استفاده از این توابع هدف تا حدودی منجر به تطابق کامل بین آسیب واقعی و محاسبه شده می‌شود. با این حال در موارد آسیب پیچیده و وارد کردن نویز نتایج چندان دقیق نیستند.

**۴-۲- نتایج بهینه سازی تک هدفه با اضافه کردن نویز به شکل مود ها**

به منظور شبیه‌سازی داده های اندازه‌گیری شده با داده های تجربی، نویز ۳ درصد را با استفاده از رابطه (۷) به شکل مودهای تیر اضافه می‌شود[۴]

$$Q^{i}_{j,exp} = Q^{i}_{j,num}(1 + \text{Noise Ratio}.\ \xi) \qquad (۷)$$

که در رابطه ۷ $Q^{i}_{j,exp}$ درجه آزادی i ام از شکل مود j ام تجربی، $Q^{i}_{j,num}$ درجه آزادی i ام از شکل مود j ام عددی، Noise Ratio ماکزیمم درصد نویز و ξ عدد رندوم است.

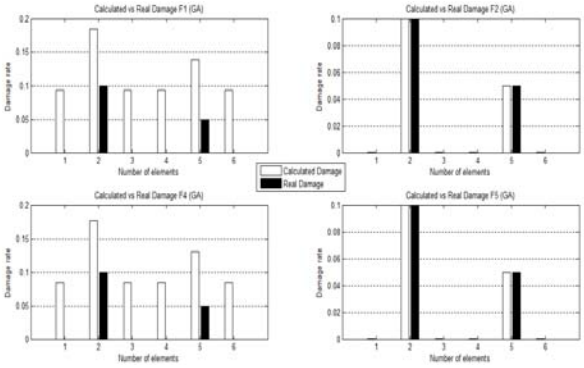



**شکل ۴** مقادیر واقعی و محاسبه شده آسیب با نویز ۳ درصد با استفاده از توابع هدف F1,F2,F3,F4,F5

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود الگوریتم ژنتیک بر اساس توابع هدف انعطاف پذیری و شکل مود در المان‌های دیگر نیز آسیب را نشان می‌دهد و تنها زمانی که از معیار *MTMAC* به عنوان پاسخ ورودی استفاده می‌شود پیش‌بینی بهتری از میزان و محل آسیب حتی با وارد شدن نویز به دست می‌دهد و خطای آن در نشان دادن آسیب در المان های دیگر نسبت به بقیه توابع کمتر است. زیرا *MTMAC* شامل هر دو داده های فرکانس طبیعی و شکل مود ها می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در مسائل بهینه سازی انتخاب تابع هدف مناسب از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد.

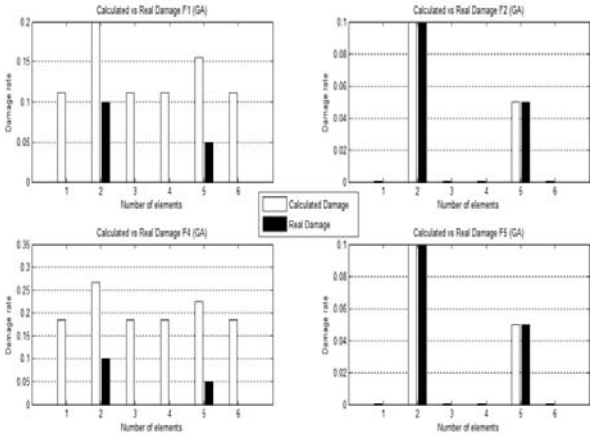
**۴-۳- بررسی اثر تعداد شتاب‌سنج ها وشکل مودها بر نتایج بهینه سازی تک هدفه**

به منظور بررسی اثر شکل مودها در شناسایی آسیب، ابتدا نتایج شناسایی آسیب با استفاده از الگوریتم ژنتیک براساس چهار شکل مود اول و سپس نتایج بر اساس شکل مودهای بدست آمده از قرار دادن شتاب‌سنج بر روی دو المان تیر بررسی می‌شود.




**شکل ۵** مقادیر واقعی و محاسبه شده آسیب با چهار شکل مود اول تیر با استفاده از توابع هدف F1,F2,F4,F5

همانطور که از شکل ۵ استنباط می‌شود، دقت نتایج حاصل از در نظر گرفتن چهار شکل مود اول برای شناسایی آسیب تا حدودی با دقت نتایج حاصل از در نظر گرفتن تمام شکل مودها یکسان می‌باشد. پس استفاده از چهار شکل مود اول تیر (ناکاملی شکل مودها) برای شناسایی آسیب مشکلی ایجاد نمی‌کند.




**شکل ۶** مقادیر واقعی و محاسبه شده آسیب با قرار دادن شتاب‌سنج بر روی دو المان تیر با استفاده از توابع هدف F1,F2,F4,F5

سنجش شکل مودها، به حسگرهای فراوانی نیاز دارد که افزایش آن ها، خطاهای اندازه‌گیری را بالا می برد. از سوی دیگر با قرار دادن شتاب‌سنج برروی تمام المان های تیر، جرم تیر افزایش می یابد. همین امر باعث خطا در محاسبات می‌شود. از طرفی قرار دادن شتاب‌سنج برروی تمام المان های سازه در عمل امکان پذیر نمی‌باشد. از بررسی شکل ۶ استنباط می‌شود، معیار *MTMAC* با وجود قرار دادن فقط دو شتاب‌سنج بر روی تیر در تعیین محل و میزان آسیب می تواند موفق می‌باشد. پس می‌توان گفت با انتخاب تابع هدف مناسب به نتایج صحیح تری دست می‌یابیم.

**۴-۴- نتایج تبدیل مسئله بهینه سازی چندهدفه به تک هدفه با وزن دهی به توابع هدف**

**۴-۴-۱- بهینه سازی براساس شکل مود و فرکانس طبیعی**

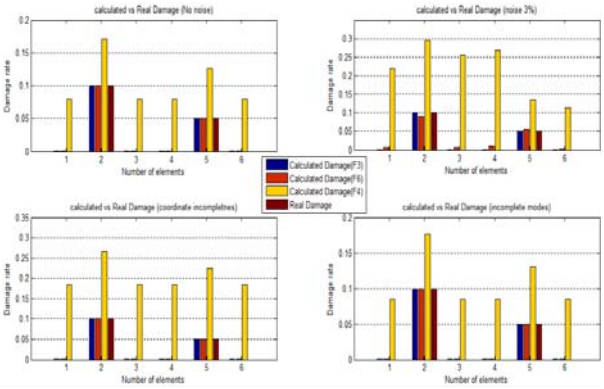
فرکانس های طبیعی و شکل مودها از مشخصه های دینامیکی مهم سازه‌ها هستند. پژوهشگران از این عوامل برای تشخیص خسارت سازه‌ای استفاده نموده اند. بیشتر راهکارها براساس کمینه کردن خطای میان پاسخ

های تحلیلی و تجربی استوار شده اند. در آسیب یابی براساس مشخصه های دینامیکی، استفاده از شکل مود، مناسب تر از فرکانس طبیعی می‌باشد. زیرا شکل مود نسبت به فرکانس های طبیعی، مشخصه های بیشتری از سازه را در اختیار می‌گذارد. همانطور که ذکر شد فقط به کارگیری شکل مود در فرآیند بهینه سازی، برای شناسایی آسیب،کافی نمی‌باشد. به سخن دیگر، اگر سختی همه عضوها به یک نسبت افزایش یا کاهش یابد، هیچ تغییری در شکل مودها ایجاد نمی‌شود. برخلاف آن ها، فرکانس های طبیعی به یک نسبت تغییر می‌کنند. بر این اساس، افزودن جمله هایی از تفاوت بین فرکانس های طبیعی تحلیلی و اندازه‌گیری شده به ترم‌های داده‌های شکل مودها، در تابع هدف مناسب خواهد بود.

$$F_6 = \sum_{m} F_3 + W \times \sum F_4 \qquad (۸)$$

$$F_6 = \sum_{j=1}^{m} \left( \frac{\omega_{num\,j} - \omega_{exp\,j}}{\omega_{num\,j}} \right)^2 + W * \sum_{j=1}^{m} \left( \frac{\emptyset_{num\,j} - \emptyset_{exp\,j}}{\emptyset_{num\,j}} \right)^2 \qquad (۹)$$

که m تعداد درجات آزادی می باشد. ضریب وزنی (W=2) بعد از تعدادی تست اجرا شده توسط الگوریتم ژنتیک بدست آمده است. به منظور شبیه‌سازی داده های اندازه‌گیری شده با داده های تجربی، نویز ۳ درصد با استفاده از رابطه ۷ به شکل مودهای تیر اضافه می‌شود.




**شکل ۷** مقادیر واقعی و محاسبه شده آسیب با استفاده ار تابع هدف F6

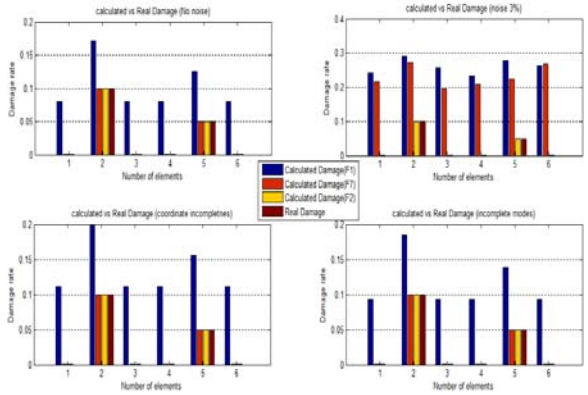
با توجه به شکل ۷ الگوریتم ژنتیک با استفاده از تک تابع هدف براساس هر دو مشخصه دینامیکی، فرکانس طبیعی و شکل مود، تقریبا منجر به تطابق کامل بین مقادیر آسیب واقعی و اندازه‌گیری شده است. ولی با اضافه شدن نویز به فرکانس طبیعی، در تعیین محل و میزان آسیب موفق نبوده است. به طوری که برخی از المان‌های سالم را آسیب دیده نشان می دهد. از شکل ۷ ملاحظه می‌شود، دقت نتایج شناسایی آسیب در حالت‌هایی که تعداد شتاب‌سنج‌ها کاهش یافته و یا چهار شکل مود اول تیر در نظر گرفته شده، تا حدودی نزدیک به دقت نتایج حاصل از قرار دادن شتاب‌سنج بر روی تمام المان‌های تیر و در نظرگرفتن تمام شکل مودها می‌باشد. پس در نظر گرفتن تعدادی از شکل مودها برای کاهش حجم محاسبات یا محدودیت رنج فرکانسی اندازه‌گیری و یا محدودیت تعداد شتاب‌سنج‌ها منطقی به‌نظر می‌رسد.

**۴-۴-۲- بهینه سازی براساس معیار MTMAC و MACFLEX**

به منظور ترکیب توابع هدف براساس معیار MTMAC و MACFLEX تابع با رابطه ۱۰ پیشنهاد می‌شود.

$$F_7 = \sqrt{\left(W * (1 - MACFLEX)\right)^2 + (1 - MTMAC)^2} \qquad (۱۰)$$

ضریب وزنی (W=10) بعد از تعدادی تست اجرا شده توسط الگوریتم ژنتیک به‌دست آمده است. به‌منظور شبیه‌سازی داده‌های اندازه‌گیری شده با داده های تجربی، نویز ۳ درصد با استفاده از رابطه ۷ به شکل مودهای تیر اضافه می‌شود.




**شکل۸** مقادیر واقعی و محاسبه شده آسیب با استفاده از الگوریتم ژنتیک براساس تابع هدف F7

با توجه به شکل۸ الگوریتم ژنتیک با استفاده از تک تابع هدف با استفاده همزمان از هر دو معیار MACFLEX و MTMAC، تاحدودی منجر به تطابق کامل بین مقادیر آسیب واقعی و اندازه‌گیری شده از المان تیر می‌شود. ولی با اضافه شدن نویز در تعیین محل و میزان آسیب اصلا موفق نمی‌باشد. از شکل ۸ ملاحظه می‌شود، دقت نتایج شناسایی آسیب در حالت‌های کاهش تعداد شتاب‌سنج‌ها و یا در نظر گرفتن چهار شکل مود اول تیر، تاحدودی نزدیک به دقت نتایج حاصل از قرار دادن شتاب‌سنج بر روی تمام المان‌های تیر و در نظرگرفتن تمام شکل مودها می‌باشد. پس در نظر گرفتن تعدادی از شکل مودها برای کاهش حجم محاسبات یا محدودیت رنج فرکانسی اندازه‌گیری و یا محدودیت تعداد شتاب‌سنج‌ها منطقی به‌نظر می‌رسد.

در روش تبدیل مسئله چندهدفه به یک مسئله تک هدفه، انتخاب مقدار مناسب وزن ها به منظور مشخص نمودن ارجحیت های تصمیم‌گیرنده با مشکل روبرو است. در عمل، انتخاب مناسب و دقیق مقدار وزن هریک از توابع هدف حتی برای مسائلی که اشراف کامل بر روی آنها توسط فرد تصمیم‌گیرنده وجود دارد، امکان‌پذیر نیست. ساده سازی ها توسط ضرایب وزنی، هیچ‌یک در روش های نوین حل مسائل چندهدفه موردنیاز نیستند. به همین دلیل، الگوریتم ژنتیک چندهدفه امکان مدل سازی و حل یک مسئله چندهدفه بدون نیاز به ساده سازی و به شکل واقعی آن را فراهم می کند.

**۴-۵- نتایج بهینه سازی براساس الگوریتم ژنتیک چندهدفه**

در این نوع مسائل، سعی بر یافتن یک مجموعه از جواب هایی است که توازن نسبی بین اهداف مختلف برقرار کنند. به این پاسخ ها، جوابهای متعادل کننده گفته می‌شود که تصمیم گیرنده می تواند بر حسب شرایط مسئله یکی از آنها را برگزیند. در اینجا برای ترکیب توابع، به جای استفاده از ضریب وزنی دلخواه، از یک الگوریتم ژنتیک چندهدفه که بطور همزمان دو تابع هدف را به حداقل می رساند استفاده می‌شود. مقادیر پارامتر های الگوریتم ژنتیک چندهدفه در جدول ۳ آمده است.

**جدول ۳** مقادیر پارامتر های الگوریتم ژنتیک چندهدفه

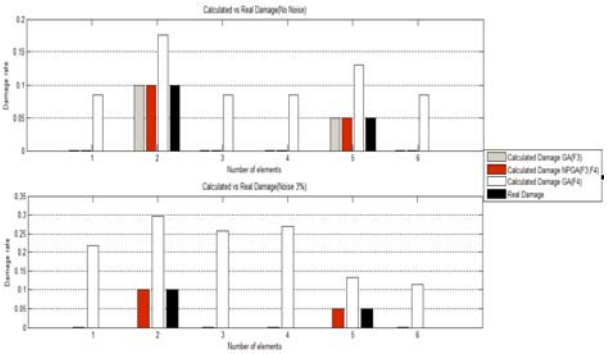
| پارامترهای الگوریتم ژنتیک | مقادیر |
|---|---|
| تعداد جمعیت | ۱۰۰۰ |
| تعداد نسل ها | ۱۰۰۰ |
| تلرانس تابع هدف | $۱\times۱۰^{-۹}$ |
| نسبت جبهه پارتو | ۰,۰۰۵ |

مجموعه جواب بهینه پارتو در پنج اجرا بر روی تیر یکسر گیردار با دو المان آسیب دیده، براساس توابع هدف (F1,F2)، (F3,F4) و (F2,F5) بدست آورده می‌شود.

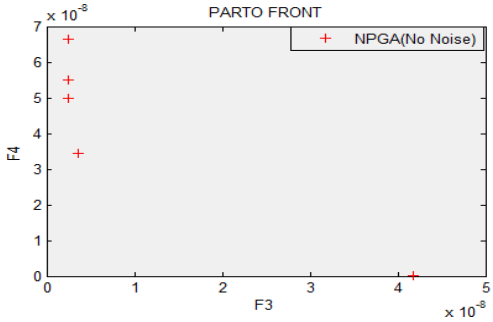
**۴-۵-۱- الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع هدف F3 و F4**

در مسئله بهینه سازی به منظور تعیین محل و تخمین شدت آن آسیب در تیر، تابع هدف F3 وF4 همزمان به حداقل می رسند. به منظور شبیه‌سازی داده‌های اندازه‌گیری شده با داده های تجربی، نویز ۳ درصد با استفاده از رابطه ۷ به شکل مودهای تیر اضافه می‌شود.

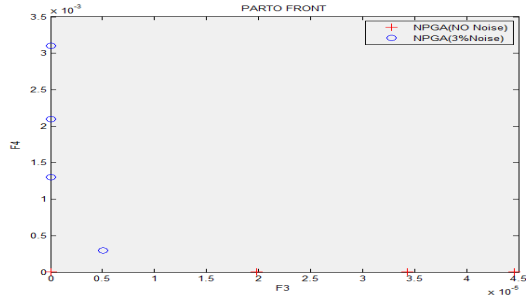
در این استراتژی چندهدفه از مزایای فرکانس های طبیعی تیر به همراه شکل مودهای آن برای تعیین محل و تخمین شدت آسیب استفاده می‌شود. در نتیجه مسئله تعیین محل و میزان آسیب به عنوان یک مسئله چندهدفه بیان می‌شود. در واقع استفاده همزمان این دو منجر به نتایج بهتری در شناسایی آسیب می‌شود. برتری الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع F3 و F4 در تعیین محل و میزان آسیب نسبت به الگوریتم ژنتیک ساده براساس تابع هدف F4، به وضوح در شکل ۹ ملاحظه می‌شود. علاوه بر این، نویز نتایج بهینه سازی چندهدفه را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد




**شکل ۹** مقادیر واقعی و محاسبه شده آسیب توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع هدف F3 و F4 در دو حالت داده های بدون نویزو با نویز ۳٪




**شکل ۱۰** مجموعه بهینه پارتو برای دو تابع هدف F3 و F4



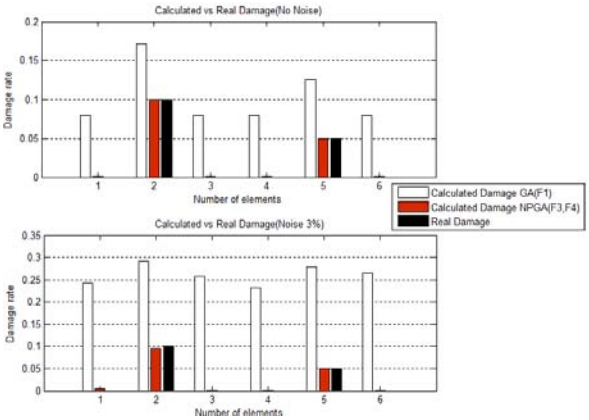

**شکل ۱۱** مجموعه بهینه پارتو برای دو تابع هدف F3 و F4 (در دوحالت داده‌های بدون نویز و با نویز ۳٪)

با توجه به اشکال ۱۰ و ۱۱ منطقی است که فاصله مجموعه بهینه پارتو از مبدا برای حالت بدون نویز کم تر از حالت نویزدار می‌باشد (مبدا نقطه ایده‌ال می‌باشد). از نتایج بدست آمده حالت با نویز، آشکار است بهینه سازی چندهدفه پیش بینی آسیب را بهبود می بخشد. بنابراین، انتخاب تابع هدف F3 و F4 برای بیان ریاضی مسئله چندهدفه و بکار بردن الگوریتم NPGA منجر به روش قوی پیش بینی آسیب برای تعیین محل وتخمین شدت آسیب می‌شود.

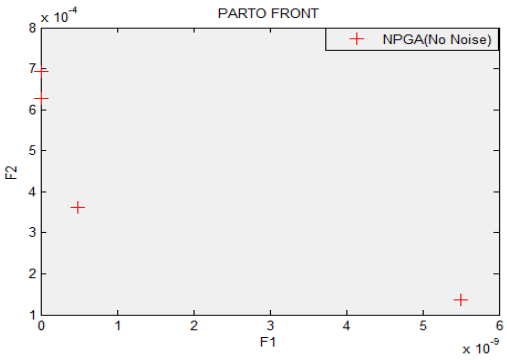
**۴-۵-۲- الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع هدف F1 و F2**

در مسائل بهینه سازی به منظور تعیین محل و میزان آسیب در تیر،تابع هدف F2 وF1 همزمان به حداقل می رسند. به منظور شبیه‌سازی داده های اندازه‌گیری شده با داده های تجربی، نویز ۳ درصد با استفاده از رابطه ۷ به شکل مودهای تیر اضافه می‌شود.

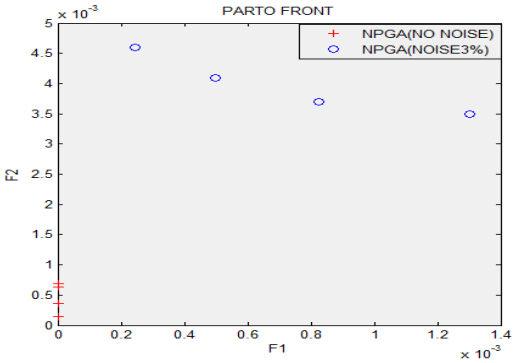
تابع هدف F1 یک شاخص قابل اعتماد برای شناسایی محل آسیب نمی‌باشد. در این استراتژی چندهدفه از مزایای انعطاف پذیری مودال به عنوان ابزار شناسایی به همراه معیار MTMAC برای تعیین محل آسیب استفاده می‌شود. در نتیجه مسئله تعیین محل و میزان آسیب به عنوان یک مسئله چندهدفه بیان می‌شود. برتری الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع F1 و F2 در تعیین محل و تخمین شدت آسیب نسبت به الگوریتم ژنتیک ساده براساس تابع هدف F4، به وضوح در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود. علاوه بر این، نویز نتایج بهینه سازی چندهدفه را آن چنان تحت تاثیر قرار نمی دهد.




**شکل ۱۲** مقادیر واقعی و محاسبه شده آسیب توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع هدف F1 و F2 در دو حالت داده های بدون نویز و با نویز ۳٪




**شکل ۱۳** مجموعه بهینه پارتو برای دو تابع هدف F1 و F2



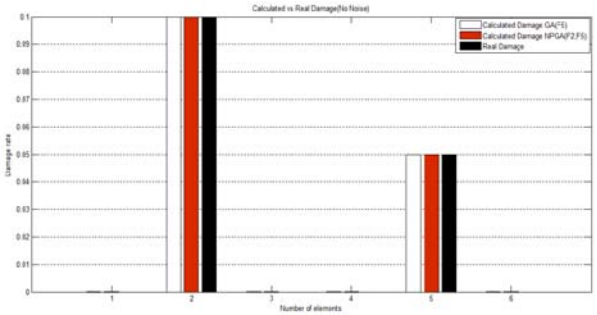

**شکل ۱۴** مجموعه بهینه پارتو برای دو تابع هدف F1 و F2 (در دوحالت داده‌های بدون نویز و با نویز ۳٪)

با توجه به اشکال ۱۳ و ۱۴ همانطور که ذکر شد، منطقی است که فاصله مجموعه بهینه پارتو از مبدا برای حالت بدون نویز کم‌تر از حالت نویزدار باشد (مبدا نقطه ایده ال می‌باشد). از نتایج بدست آمده حالت با نویز، آشکار است بهینه سازی چندهدفه پیش بینی آسیب را بهبود می بخشد. بنابراین، انتخاب تابع هدف F1 وF2 برای بیان ریاضی مسئله چندهدفه و بکار بردن الگوریتم NPGA منجر به روش قوی پیش بینی آسیب برای تعیین محل ومیزان آسیب می‌شود.

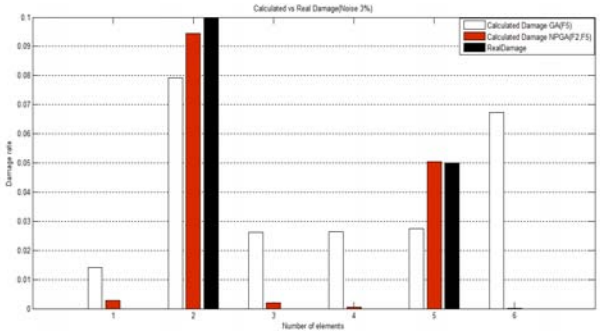
### ۴-۵-۳- الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع هدف F5 و F2

در مسائل بهینه سازی به منظور تعیین محل و میزان آسیب در تیر،تابع هدف F2 وF5 همزمان به حداقل می رسند. به منظور شبیه‌سازی داده های اندازه‌گیری شده با داده های تجربی، نویز ۳ درصد مطابق رابطه ۷ به شکل مودهای تیر اضافه می‌شود.

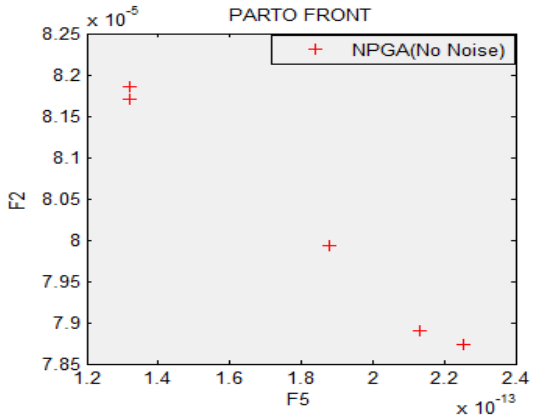
در این استراتژی چندهدفه از مزایای اختلاف بین انعطاف پذیری مودال تحلیلی و تجربی به عنوان ابزار شناسایی آسیب به همراه معیار MTMAC برای تعیین محل آسیب استفاده می‌شود. در نتیجه مسئله تعیین محل و میزان آسیب به عنوان یک مسئله چندهدفه بیان می‌شود. برتری الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع F5 و F2 در تعیین محل و میزان آسیب نسبت به الگوریتم ژنتیک ساده براساس تابع هدف F5، به وضوح در اشکال ۱۵ و ۱۶ ملاحظه می‌شود. بااین حال، با اضافه شدن نویز، آسیب کاذبی در برخی از المانهای سالم شناسایی کرده است. اگرچه بهینه سازی چند هدفه نسبت به بهینه سازی تک هدفه موفق تر می‌باشد.



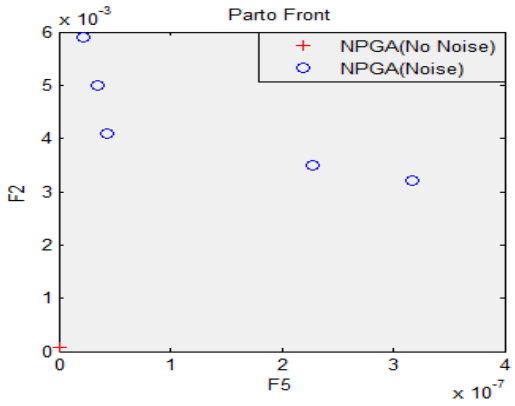
**شکل ۱۵** مقادیر واقعی و محاسبه شده آسیب توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع هدف F5 و F2



**شکل۱۶** مقادیر واقعی و محاسبه شده آسیب توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع هدف F5 و F2 با نویز ۳٪




**شکل ۱۷** مجموعه بهینه پارتو برای دو تابع هدف F5 و F2



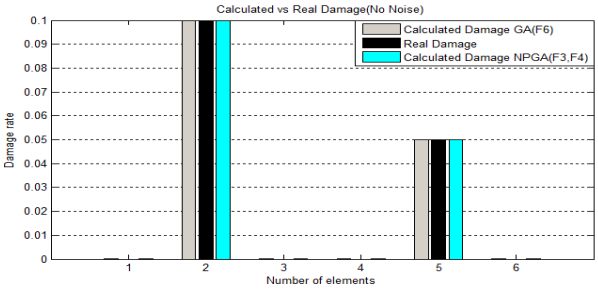

**شکل ۱۸** مجموعه بهینه پارتو برای دو تابع هدف F5 و F2 (در دوحالت داده‌های بدون نویز و با نویز ۳٪)

از نتایج بدست آمده حالت با نویز، آشکار است بهینه سازی چندهدفه پیش بینی آسیب را بهبود می بخشد. بنابراین، انتخاب تابع هدف F5 و F2 برای بیان ریاضی مسئله چندهدفه و بکار بردن الگوریتم NPGA منجر به بهبود روش پیش بینی آسیب برای تعیین محل ومیزان آسیب می شود.

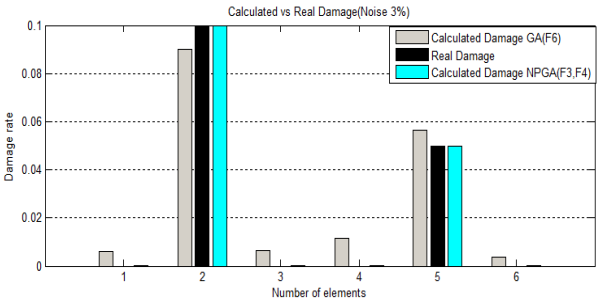
از مقایسه نتایج نمودار جبهه پارتو الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع (F1,F2)، (F3,F4) و (F2,F5) ملاحظه می شود که الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع (F1,F2) و (F3,F4) جبهه پارتو منظم‌تر و پیوسته‌تری نسبت به تابع (F2,F5) دارد و از سوی دیگر فاصله مجموعه جواب‌های بهینه پارتو توابع (F1,F2) و (F3,F4) از مبدا که نقطه ایده‌ال می باشد نسبت به تابع (F2,F5) کمتر است. پس می‌توان گفت الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع (F1,F2) و (F3,F4) موفق‌تر بوده است.

### ۴-۶- مقایسه دقت نتایج شناسایی آسیب الگوریتم ژنتیک ساده و الگوریتم ژنتیک چندهدفه با استفاده از توابع F3 و F4

در اینجا دقت نتایج شناسایی آسیب ژنتیک ساده براساس تجمیع توابع F3 و F4 (همان تابع F6) با دقت نتایج شناسایی آسیب با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع هدف F3 و F4 در دو حالت بدون نویز و با اضافه شدن نویز به شکل مودها بررسی می شوند. اشکال ۱۹ و ۲۰ نتایج حاصله را نمایش می‌دهند.



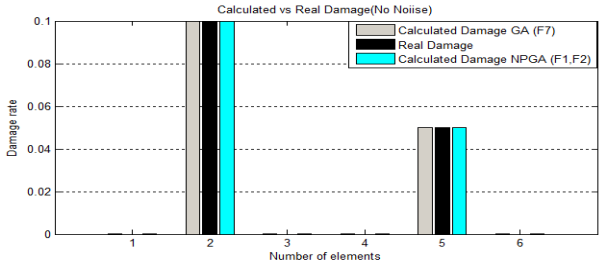

**شکل ۱۹** نتایج آسیب واقعی و محاسبه شده



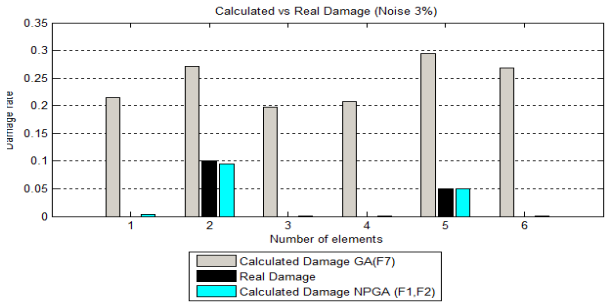

**شکل ۲۰** نتایج آسیب واقعی و محاسبه شده با نویز

### ۴-۷- مقایسه دقت نتایج شناسایی آسیب الگوریتم ژنتیک ساده و الگوریتم ژنتیک چندهدفه با استفاده از توابعF1 و F2

در این قسمت دقت نتایج شناسایی آسیب ژنتیک ساده براساس تجمیع توابع F2 و F1 (همان تابع F7) با دقت نتایج شناسایی آسیب با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس توابع هدف F2 و F1 در دو حالت بدون نویز و با اضافه شدن نویز به شکل مودها بررسی می شوند. اشکال ۲۱ و ۲۲ نتایج حاصله را نمایش می‌دهند.




**شکل ۲۱** نتایج آسیب واقعی و محاسبه شده




**شکل ۲۲** نتایج آسیب واقعی و محاسبه شده با نویز

استفاده از رویکرد چندهدفه به جای استفاده از ضرایب وزنی برای تبدیل چند هدف به تک هدف نقاط ضعف آن، از جمله انتخاب ضریب وزنی مناسب را از بین می برد. زیرا در این روش تمام حل های قابل قبول که در فضای متغیر طراحی بدست آمده، مجموعه ای از جواب های متعادل را تشکیل می‌دهند. از شکل ۲۰ و ۲۲ ملاحظه می‌شود که نویز نتایج بهینه سازی چندهدفه در شناسایی آسیب را کم تر از حالت تجمیع توابع هدف تحت تاثیر قرار داده است. الگوریتم ژنتیک بکار برده شده در این مقاله (روش NPGA) [1] است. از مزیت استفاده NPGA دقت بالاتر و خطای کمتر در پیش‌بینی المان‌های سالم و در نتیجه موثرتر بودن آن در تعیین محل وتخمین شدت آسیب نسبت به GA به ویژه در حضور نویز می باشد.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش المان محدود ابتدا یک تیر یکسرگیردار با دو المان آسیب دیده در نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده و سپس الگوریتم ژنتیک تک و چندهدفه با استفاده از توابع هدف مختلف به دست آمده از پارامترهای مودال برای تعیین میزان و محل ترک بکار گرفته می‌شود. . به منظور حل مسائل چندهدفه از دو روش، روش اول تبدیل مسئله چندهدفه به تک هدفه با وزن دهی به توابع هدف و روش دوم از مجموعه جواب های بهینه پارتو الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده می‌شود. برای مقایسه توابع هدف مختلف اثر ناکاملی درجات آزادی اندازه گیری شده، محدوده فرکانسی اندازه گیری و همچنین نویز محیطی بر نتایج شناسایی آسیب مورد مطالعه قرار می گیرد.

نتایج نشان می‌دهد که توابع هدف بر پایه شکل مود به تنهایی و MACFLEX در شناسایی محل آسیب مشکل دارند و نواحی سالم را به اشتباه به صورت آسیب دیده معرفی می‌کنند. تابع هدف برپایه فرکانسهای طبیعی نتایج بهتری دارد. اما به دلیل حساسیت فرکانس طبیعی به نویز، در حضور

[1] Niched Parto Genetic Algorithm

نویز محیطی دقت خوبی ندارد. در میان توابع هدف مورد بررسی، تابع هدف براساس MTMAC توانایی بیشتری در شناسایی محل و میزان آسیب دارد.

نمودارهای مربوط به بهینه سازی چند هدفه با و بدون تجمیع توابع و نشان می‌دهد که تجمیع توابع لزوما نتایج بهتری در پی ندارد و حتی در مواردی به بدتر شدن نتایج می‌انجامد. اما در صورتی که از بهینه سازی چندهدفه بدون تجمیع توابع استفاده گردد نتایج بهتری حاصل خواهد شد. به خصوص در صورتی که از تابع برپایه MTMAC با تابع برپایه فرکانس طبیعی به صورت توامان استفاده شود که مقاومت خوبی به نویز نشان می‌دهد.

## ۶- مراجع


[1] J.D. Villalba, J.E. Laier, "Localising and quantifying damage by means of a multi-chromosome genetic algorithm" Advances in Engineering

[2] E. Jamshidi, B. Jamshidi, F. Taghi Khaki, A .Arghavan, Review of damage detection methods based on modal parameters, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration,* Vol. 7, No. 1, pp. 7-14, 2015. (In Persian)

[3] B. Jaishia, W.X. Rean, " Damage identification by the eigenparameter decomposition of structrual flexibility change," International Journal for Numerical Methods in Engeering, Issu 4, pp. 444-459, 2009.

[4] M. Papadrakakis, "Strructural damage localization and quantification using modern optimization techniques," School of Civil Engineering Institute of Structural Analysis and Seismic Research, 2012.