

## عیب‌یابی سازه‌های مکانیکی با استفاده از الگوریتم پرندگان (PSO)

منصور پیمانی<sup>۱</sup>، محمد تقی وکیل باغمیشه<sup>۱</sup>، سید مرتضی همایون صادقی<sup>۲</sup>، میر محمد اتفاق<sup>۲</sup><sup>۱</sup> آزمایشگاه سیستم‌های هوشمند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز<sup>۲</sup> آزمایشگاه ارتعاشات و آنالیز مودال، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

E-mail: mpeimani@gmail.com, mvakil@tabrizu.ac.ir, morteza@tabrizu.ac.ir, ettefagh@tabrizu.ac.ir

چکیده - عیب‌یابی و بررسی سلامت سازه‌ها از جهت جلوگیری از صدماتی که در آینده ممکن است رخ دهد، دارای اهمیت می‌باشد. در این مقاله تخمین محل و عمق ترک در سازه تیر یک سر گیردار به صورت مسأله بهینه‌سازی فرمول‌بندی شده است و محل و عمق بهینه با مینیمم کردن تابع هزینه‌ای که بر اساس تفاوت چهار فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از مدل تعریف می‌شود، به دست می‌آید. جهت حل مسأله بهینه‌سازی از الگوریتم پرندگان (PSO) استفاده شده است و نحوه تنظیم و اعمال آن در مسأله عیب‌یابی بررسی شده است. الگوریتم PSO نسبت به سایر الگوریتم‌های هوشمند دقیقتر، سریعتر و ساده‌تر می‌باشد. جهت بهبود کارایی این الگوریتم اصلاحاتی پیشنهاد شده است. فرکانسهای طبیعی تیر ترک‌دار در بخش مدلسازی از معادلات تحلیلی تیر با جاگذاری فنر در محل ترک و کاهش سفتی آن متناسب با شدت عیب و در بخش آزمایشات عملی از روی پاسخ فرکانسی سازه عیب‌دار و آنالیز مودال به دست می‌آید.

کلید واژه- الگوریتم پرندگان (PSO)، تیر، عیب‌یابی، فرکانس طبیعی.

## ۱- مقدمه

عیب‌یابی مانند ترک در سازه‌ها باعث کاهش سفتی در ناحیه عیب و تغییر فرکانسهای طبیعی سازه‌ها می‌گردد. در مرجع [۸] روشهای عیب‌یابی با فرکانسهای طبیعی مرور شده است. برای حل مسأله معکوس یا عیب‌یابی سازه می‌توان از الگوریتم‌های هوشمند استفاده کرد. به طوری که مؤلفین در مقالات قبلی از روش الگوریتم‌های ژنتیکی (GA) و شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت حل این مسأله استفاده کرده‌اند [۱۰، ۹]. در این مقاله الگوریتم پرندگان (PSO) معرفی می‌شود [۱۱] و مسأله عیب‌یابی سازه به صورت تخمین محل و شدت ترک در سازه تیر به کمک PSO حل می‌شود. از این رو ابتدا مسأله تخمین محل و عمق ترک در تیر یک سر گیردار به صورت مسأله بهینه‌سازی فرمول‌بندی

طی دهه اخیر استفاده از روشهای عیب‌یابی مبتنی بر پارامترهای ارتعاشی موضوع تحقیقات بوده است. عده‌ای از محققین روشهایی برای تخمین تأثیرات عیب روی پارامترهای ویژه سازه ارائه کرده‌اند (مسأله مستقیم)، در حالیکه برخی دیگر روی مسأله شناسایی، مکان‌یابی و تشخیص میزان عیب کار کرده‌اند (مسأله معکوس) [۱-۳]. روشهای مختلف غیر مخرب برای عیب‌یابی سازه‌های مکانیکی وجود دارد [۴] که آنالیز مودال یکی از این روشها است [۵]. در مراجع [۷، ۶] تحقیقات انجام شده در زمینه عیب‌یابی با استفاده از دیتای ارتعاشات مرور شده است. بروز

۲. برای هر ذره تابع شایستگی محاسبه می‌شود.
۳. مقدار شایستگی ذره با  $P_{best}$  آن مقایسه می‌شود، و اگر مقدار فعلی از  $P_{best}$  بهتر بود،  $P_{best}$  برابر مقدار فعلی و  $X_{PB}$  برابر مکان فعلی  $X_i$  در فضای  $D$  بعدی می‌گردد.
۴.  $N_{best}$  برای هر ذره تعیین می‌شود.

۵. سرعت و مکان هر ذره با توجه به فرمولهای (۱) و (۲) به هنگام می‌گردند.

۶. چرخه الگوریتم از مرحله ۲ تکرار می‌شود تا زمانی که شرط توقف برآورده شود.

$$V_{i_{new}} = V_{i_{old}} + c_1 rand() (X_{NB} - X_i) + c_2 rand() (X_{PB} - X_i) \quad (1)$$

$$X_{i_{new}} = X_{i_{old}} + V_{i_{new}} \quad (2)$$

که در آن  $c_1, c_2$  دو فاکتور یادگیری در بازه  $[0.5, 2]$  هستند، و  $rand(), Rand()$  دو عدد تصادفی مستقل در بازه  $[0, 1]$  هستند.  $X_i$  موقعیت ذره  $i$ ام را نشان می‌دهد.

اصلاح سرعت بر سه اساس سرعت قبلی،  $X_{PB}$  (بهترین موقعیت قبلی ذره که پرنده خودش به دست آورده است) و  $X_{NB}$  (بهترین نتیجه‌ای که پرندگان واقع در همسایگی به دست آورده‌اند) صورت می‌گیرد.

### ۳- عیب‌یابی با الگوریتم PSO

در این بخش مشخصات تیر، چگونگی تنظیم الگوریتم پرندگان، نحوه اصلاح الگوریتم و نیز نحوه اعمال آن برای تخمین محل و عمق ترک در سازه تیر را بررسی می‌کنیم.

مشخصات تیر استفاده شده در مدلسازی و آزمایشات عملی به صورت ذیل است. طول، عرض و ارتفاع تیر به ترتیب برابر  $820mm$ ،  $20mm$  و  $10mm$  می‌باشد. جنس تیر از نوع آلومینیوم و چگالی آن برابر  $2700kg/m^3$  می‌باشد. ضریب پواسن برابر  $0.3$  و ضریب الاستیسیته معادل برابر  $62GPa$  می‌باشد.

محل ترک در بازه  $0mm < loc < 820mm$  و عمق ترک در بازه  $0mm < dep < 8mm$  در نظر گرفته می‌شوند. از آنجا که دقت مورد انتظار حداقل برابر  $1mm$  است، و بازه تغییر متغیر اول بیشتر از متغیر دوم است، نرمالیزه کردن هر دو

می‌شود و محل و عمق بهینه با مینیمم کردن تابع هزینه‌ای که بر اساس تفاوت چهار فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده تعریف می‌شود، به دست می‌آید. جهت به دست آوردن فرکانسهای طبیعی تیر ترک‌دار در بخش مدلسازی از مدل فنر با کاهش سفتی [۱۲، ۱۳] و در بخش عملی از طریق تحریک تیر و اندازه‌گیری شتاب و FFT و آنالیز مودال استفاده می‌شود.

در بخش دوم الگوریتم پرندگان (PSO) معرفی می‌شود. در بخش سوم نحوه اعمال الگوریتم PSO جهت عیب‌یابی و در بخش چهارم چگونگی انجام آزمایشات عملی شرح داده می‌شوند. بخش پنجم شامل نتایج تخمین محل و شدت عیب می‌باشد. فصل ششم به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

### ۲- الگوریتم پرندگان (PSO)

الگوریتم پرندگان در سال ۱۹۹۵ به وسیله Eberhart و Kennedy [۱۱] ابداع شد، و ایده اولیه آن از حرکت پرندگان و یا ماهیها اقتباس شده است. در این روش هر جواب مسأله به عنوان یک پرنده در نظر گرفته شده و "particle" نامیده می‌شود. هر پرنده یک fitness دارد که بر اساس موقعیت آن در فضای جستجو محاسبه می‌شود. همچنین هر پرنده دارای یک بردار سرعت است که جهت حرکت پرنده را مشخص می‌کند. مقادیر سه متغیر دیگر نیز از در حین اجرای الگوریتم به دست می‌آیند.  $P_{best}$  بهترین نتیجه‌ای است که یک پرنده به دست آورده‌اند.  $N_{best}$  بهترین نتیجه‌ای است که پرندگان واقع در همسایگی یک پرنده به دست آوردند.  $G_{best}$  بهترین نتیجه‌ای است که به وسیله تمام پرندگان در طول اجرای الگوریتم به دست آمده است. که اگر همسایگی کل فضای جستجو را در بر گیرد،  $N_{best}$  برابر  $G_{best}$  خواهد بود.

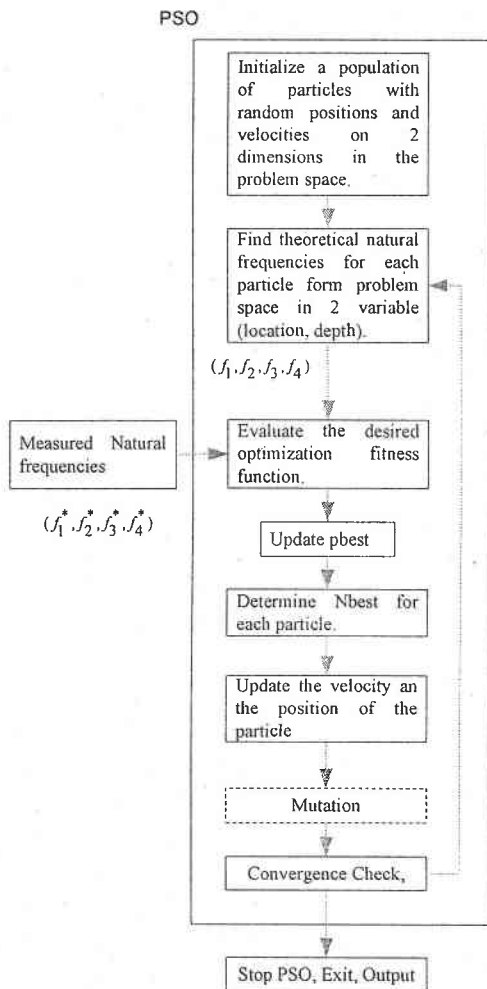
هر پرنده جهت خود را بر دو اساس تجربه شخصی (Cognition part) و تجربه دوستانش (Social part) اصلاح می‌کند.

### ۲-۱- الگوریتم یادگیری PSO

الگوریتم پایه برای تحقق PSO به صورت ذیل است.

۱. جمعیت پرندگان با موقعیتهای و سرعتهای تصادفی در  $D$  بعد فضای مسأله مقداردهی اولیه می‌شوند.

PSO بعد از هر تکرار 20% از پرندگان که بدترین fitness را دارند حذف شده و به همان تعداد پرنده با موقعیت و سرعت رندام به فضای جستجو اضافه می‌شوند. این تغییر



شکل ۱: فلوجارت اعمال PSO جهت عیب‌یابی

باعث افزایش سرعت همگرایی، افزایش دقت تخمین و همچنین کاهش احتمال گیر کردن الگوریتم در مینیمم محلی می‌شود. در مواردی که الگوریتم در مینیمم محلی گیر کند، می‌توان الگوریتم را با شروع از نقاط اولیه متفاوت اجرا کرد.

#### ۴- آزمایشات عملی جهت استخراج فرکانسهای طبیعی

جهت اعمال روش عیب‌یابی مطرح شده لازم است که

متغیر به یک بازه مثلاً [0,1] باعث تضعیف و کاهش دقت الگوریتم PSO خواهد شد، بنابراین مقادیر متغیرها را نرمالیزه نمی‌کنیم.

فلوجارت الگوریتم عیب‌یاب سازه تیر جهت تخمین محل و عمق ترک بر اساس الگوهای فرکانسی در شکل ۱ دیده می‌شود. همانگونه که در شکل ۱ دیده می‌شود ورودیهای سیستم عیب‌یاب چهار فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده می‌باشند که با  $f_i^*, i=1, \dots, 4$  نشان داده شده‌اند. فرکانسهای طبیعی محاسبه شده از مدل با  $f_i, i=1, \dots, 4$  نشان داده می‌شود. تابع هزینه مسأله بهینه سازی تخمین محل و عمق ترک به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$Cost(l, d) = \sum_{i=1}^4 abs(f_i - f_i^*) \quad (3)$$

که در آن  $l, d$  دو متغیر مسأله یعنی محل و عمق ترک می‌باشند.

با توجه به رابطه (۱) جستجو در فضای مسأله توسط دو فاکتور یادگیری  $c_1$  و  $c_2$  هدایت می‌شود، بنابراین تنظیم این دو ضریب در پیدا کردن سریع جواب بهینه مؤثر است. تغییر ضرایب  $c_1$  و  $c_2$  به صورت روابط (۴) و (۵) انجام می‌شود:

$$c_1 = -1.5 \frac{iter}{Maxit} + 2 \quad (4)$$

$$c_2 = 1.5 \frac{iter}{Maxit} + 0.5 \quad (5)$$

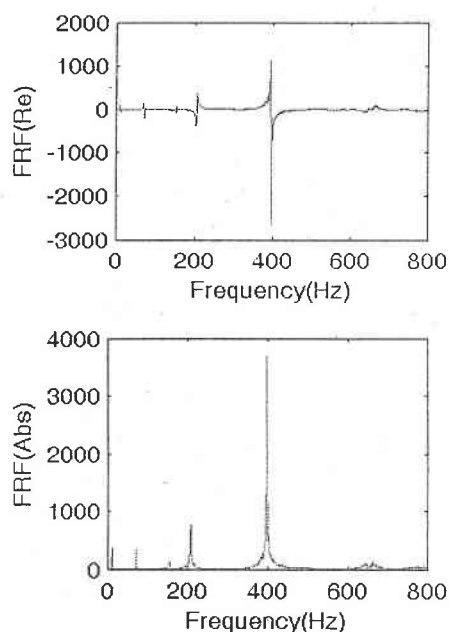
که در آن  $iter$  شماره تکرار فعلی الگوریتم و  $Maxit$  ماکزیمم تعداد الگوریتم است، که برابر 200 در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب اینرسی طبق رابطه (۶) به رابطه (۱) اضافه می‌گردد.

$$w = 0.5 + \frac{Rand[0,1]}{2} \quad (6)$$

با توجه به اینکه افزایش تعداد ذرات باعث افزایش زمان محاسبه می‌گردد ولی تأثیر چندانی روی کاهش زمان همگرایی و یا افزایش دقت پاسخ ندارد، تعداد ذرات برابر ۱۰ در نظر گرفته می‌شود.

الگوریتم PSO اصلاح شده: جهت افزایش کارایی الگوریتم

الگوریتمهای برازش منحنی استخراج می‌گردند.



شکل ۲: پاسخ فرکانسی تیر آلومینیومی

نتایج اندازه‌گیری فرکانسهای طبیعی تیر عیب‌دار در ۶ حالت تجربی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: نتایج عملی اندازه‌گیری فرکانسهای طبیعی

loc(mm)	dep(mm)	f1(Hz)	f2(Hz)	f3(Hz)	f4(Hz)
30	1	11.494	72.106	201.994	395.861
30	2	11.472	72.035	201.919	395.859
30	3	11.369	71.736	201.618	395.790
600	1	11.509	72.105	201.977	395.732
600	2	11.494	71.925	201.734	395.300
600	3	11.470	71.642	201.379	394.578

#### ۵- نتایج تخمین محل و عمق عیب

آزمایشات جهت ارزیابی روش پیشنهادی عیب‌یابی را در دو بخش انجام می‌دهیم. در بخش اول فرکانسهای اندازه‌گیری شده را که از مدل سازه برای ۲۱ نقطه تست به دست آمده‌اند، به الگوریتم PSO اعمال می‌کنیم. مشخصات نقاط تست و نتایج تخمین مربوط به این بخش در جدول ۲ دیده می‌شوند. ماکزیمم، میانگین و مینیمم نتایج روشهای GA و PSO در جدول ۳ مشخص شده است. ملاحظه می‌شود که تخمین با دقت خوبی انجام شده است. با مقایسه این نتایج با نتایج حاصل از روش الگوریتمهای ژنتیکی [۹] ملاحظه می‌کنیم که نتایج PSO نسبت به نتایج الگوریتمهای ژنتیکی

فرکانسهای طبیعی سازه تیر را استخراج کنیم. به این منظور می‌توان از طریق اندازه‌گیری نیروی وارده بر سازه و اندازه‌گیری همزمان پاسخ (جابجایی، سرعت و یا شتاب) سازه بر اثر نیروی مذکور و اعمال عملیات ریاضی خاص (آنالیز مودال) روی داده‌های اندازه‌گیری شده پارامترهای ارتعاشی (فرکانسهای طبیعی) را به دست آورد. محل تحریک سازه و نصب سنسور به ترتیب در فاصله  $60\text{cm}, 9\text{cm}$  از سر گیر دار می‌باشد. برای استخراج تابع فرکانسی سازه که متشکل از توابع نیرو و پاسخ سازه مذکور در حوزه فرکانسی می‌باشد، پس از اندازه‌گیریهای مشخصات ارتعاشی سازه در حوزه زمانی، پاسخ فرکانسی سازه از طریق FFT به دست می‌آید. سیستمهای سخت‌افزاری استفاده شده به صورت زیر است.

۱. دستگاه آنالیز کننده FFT که توابع نیروی وارد بر سازه و پاسخ سازه (شتاب در یک نقطه سازه) نسبت به آن نیرو را به صورت سیگنالهای مناسب در حوزه زمانی دریافت می‌کند. همچنین ارتباط با نرم‌افزار پالس جهت پیاده کردن الگوریتم FFT برای توابع یاد شده و تبدیل آنها به توابعی در حوزه فرکانس و سپس تشکیل تابع پاسخ فرکانسی سازه از روی توابع مذکور توسط این دستگاه صورت می‌پذیرد.

۲. شتاب سنج که شتاب یک نقطه را اندازه‌گیری می‌کند و آن را به صورت سیگنال مناسب به دستگاه FFT منتقل می‌نماید.

۳. نیروسنج که نیروی وارد بر سازه را که از طریق چکش مخصوص وارد سازه می‌گردد، اندازه‌گیری می‌کند و آن را به دستگاه FFT ارسال می‌نماید.

۴. کابل‌های مخصوص جهت انتقال سیگنال.

پاسخ فرکانسی سازه در حالت سالم در شکل ۲ نشان داده شده است. بعد از استخراج پاسخ فرکانسی سازه، با به کارگیری نرم افزارهای برازش منحنی از نوع چند جمله‌ای فرکانسهای طبیعی را به دست می‌آوریم.

نرم‌افزارهای به کار گرفته شده شامل دو نرم افزار است: ۱- نرم‌افزار پالس که وظیفه مدیریت سخت افزار آنالیز کننده FFT را بر عهده دارد. ۲- نرم‌افزار Mescope که توسط آن فرکانسهای طبیعی از تابع فرکانسی سازه به کمک

و نامعینی عملی اثر خود را بیشتر نشان می‌دهد. با افزایش عمق ترک حساسیت فرکانسهای طبیعی به محل و شدت عیب بیشتر شده و نتایج تخمین بهتر می‌شود.

جدول ۴: نتایج تخمین روش PSO مربوط به داده‌های تجربی

Test point No.	Desired value (mm)		Estimation results (mm)	
	loc	dep	loc	dep
1	60.0	1.00	84.6	0.82
2	60.0	2.00	70.9	1.80
3	60.0	3.00	68.4	2.80
4	300.0	1.00	349.6	0.81
5	300.0	2.00	341.6	2.20
6	300.0	3.00	330.5	3.20

جدول ۵: ماکزیمم، میانگین و مینیمم خطای تخمین برای داده‌های تجربی با اعمال روش PSO و GA.

	GA		PSO	
	loc	dep	loc	dep
Max.	41.67%	28.00%	41.00%	19.00%
Ave.	15.82%	13.33%	14.55%	10.47%
Min.	11.07%	6.67%	10.17%	6.67%

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله روش هوشمند PSO برای تخمین محل و عمق ترک در سازه تیر بر اساس فرکانسهای طبیعی به کار گرفته شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در روش ارائه شده امکان تخمین محل و عمق عیب با اعمال چهار فرکانس طبیعی اول اندازه‌گیری شده امکان پذیر است. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج به دست آمده از روش الگوریتمهای ژنتیکی حاکی از برتری روش PSO از جنبه‌های مختلف سرعت، دقت و همچنین سادگی تحقق می‌باشد. میانگین خطای تخمین محل و شدت عیب در مجموعه تست در روش PSO به ترتیب برابر 0.46% و 0.54% است، که از نتایج مربوط به روش GA که به ترتیب برابر 1.94% و 0.95% می‌باشد، بهتر است.

عیب‌یابی سازه‌های پیچیده با روشهای هوشمند پیشرفته‌تر و با شاخصهای دیگر حساس به عیب برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد.

## سپاسگزاری

این کار تحقیقاتی طبق قرارداد شماره ۵۰۰/۴۳۶۹/ت از طرف مرکز تحقیقات مخابرات ایران حمایت مالی شده است. بدین وسیله مؤلفین از مسئولین محترم آن مرکز تشکر و

دقیقت است. با توجه به ساده بودن الگوریتم PSO نسبت به الگوریتمهای ژنتیکی سرعت آن نیز بیشتر است.

جدول ۲: نتایج تخمین محل و عمق ترک پس از اعمال الگوریتم عیب‌یابی PSO.

Test point No.	Desired value (mm)		Estimation results (mm)	
	loc	dep	loc	dep
1	98.4	1.00	97.20	0.99
2	98.4	2.00	99.00	1.98
3	98.4	3.00	98.60	3.00
4	196.8	1.00	194.80	0.99
5	196.8	2.00	198.90	1.99
6	196.8	3.00	198.90	3.00
7	295.2	1.00	299.60	0.99
8	295.2	2.00	294.40	1.99
9	295.2	3.00	295.80	2.99
10	393.6	1.00	391.20	0.99
11	393.6	2.00	395.60	1.99
12	393.6	3.00	393.20	3.01
13	492.0	1.00	493.20	1.01
14	492.0	2.00	493.10	1.98
15	492.0	3.00	491.80	3.01
16	590.4	1.00	592.00	1.01
17	590.4	2.00	592.00	1.99
18	590.4	3.00	590.50	3.00
19	688.8	1.00	694.20	1.00
20	688.8	2.00	689.10	2.01
21	688.8	3.00	690.00	3.01

جدول ۳: ماکزیمم، میانگین و مینیمم خطای تخمین به دست آمده از روشهای PSO و GA.

	GA		PSO	
	loc	dep	loc	dep
Max.	3.12%	4.53%	1.49%	1.00%
Ave.	0.95%	1.94%	0.46%	0.54%
Min.	0.04%	0.79%	0.02%	0.00%

در بخش دوم آزمایشات، چهار فرکانس اول را که در شش حالت عیب اندازه‌گیری شده‌اند، را به الگوریتم عیب‌یابی اعمال می‌کنیم. نتایج تخمین در جدول ۴ مندرج است. جدول ۵ مشخصات آماری مربوط به نتایج روشهای PSO و GA را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۵ افزایش خطای تخمین نسبت به نتایج تخمین نقاط تست بخش قبل (جدول ۳) مربوط به نامعینی‌های تجربی، خطای اندازه‌گیری فرکانسهای طبیعی و خطای مدلسازی می‌باشد. همچنین از جدول ۴ ملاحظه می‌شود که بیشترین خطا مربوط به حالتی است که عمق ترک کم است، و میزان خطا

قدردانی می‌نمایند.

### مراجع

- [1] S.I. Ishak, G.R. Liu, S.P. Lim, Study on characterization of horizontal cracks in isotropic beams, *J. Sound Vib.* 238 (4), 661-671, 2000.
- [2] S.W. Liu, J.H. Haung, J.C. Sung, C.C. Lee, Detection of cracks using neural networks and computational mechanics, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 191 (25-26), 2831-2846, 2002.
- [3] J.K. Sinha, M.I. Friswell, S. Edwards, Simplified model for the location of cracks in beam structures using measured vibration data, *J. Sound Vib.* 251 (1), 13-38, 2002.
- [4] D.J. Haas, C.G. Schaefer Jr., Emerging technologies for rotor system health monitoring, in: *American Helicopter Society 52nd Annual Forum* Washington DC, vol. 2, pp. 1717-1731, 1996.
- [5] C. Boller, Next generation structural health monitoring and its integration into aircraft design, *Int. J. Syst. Sci.* 31 (11), 1333-1349, 2000.
- [6] Y. Zou, L. Tang, G.P. Steven, Vibration based model dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structure—a review, *J. Sound Vib.* 230 (2), 357-378, 2000.
- [7] S.W. Doebling, C.R. Farrar, M.B. Prime, A summary review of vibration based damage identification methods, *Shock Vib. Dig.* 30, 91-105, 1998.
- [8] O.S. Salawu, Detection of structural damage through changes in frequency: a review, *Engrg. Struct.* 19 (9), 718-723, 1997.
- [9] Peimani M, Vakil Baghmishesh MT, Etefagh MM. Non-destructive crack detection using genetic algorithms. *Proceedings of Manufacturing Engineering, TICME 2005*. Tehran: Iran, P. 170, 2005.
- [10] Peimani M, Vakil Baghmishesh MT, Sadeghi M, Etefagh MM. Locating damage in beam like structures with Neural Networks, *Proceedings of Intelligent Systems, CIS2005*, Tehran: Iran, P. 54, 2005.
- [11] Kennedy J., Eberhart R.C., Particle Swarm Optimization, *Proc. Of IEEE international conference on Neural Networks (ICNN)*, Vol 4, 99, 1942-1948, Perth, Australia, 1995.
- [12] Rizos P.F., Aspragathos N., Dimarogonas A.D., Identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration modes. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 138, No. 3, pp. 381-388, 1990.
- [13] Shifrin E.I., "Natural frequencies of a beam with an arbitrary number of cracks", *Journal of sound and Vibration* 222(3), 409-423, 1999.