



تشخیص آسیب در خطوط انتقال گاز بر اساس تغییرات فرکانس طبیعی به کمک شبکه های عصبی مصنوعی

علی اصغر بینائیان^۱، احسان جمشیدی^{۲*}، علیرضا ارغوان^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۳- مربی، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

* سمنان، صندوق پستی: ۱۷۹-۳۵۱۴۱، Ehsan.jamshidi@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل دریافت: ۱۹ فروردین ۱۳۹۷ پذیرش: ۲۰ خرداد ۱۳۹۷ ارائه در سایت: ۱۵ مرداد ۱۳۹۷	هدف از این مقاله معرفی یک رویکرد جدید برای عیب یابی خطوط لوله انتقال گاز با استفاده از امواج مکانیکی است. در این مقاله تلاش شده است با استفاده از خصوصیات فرکانس طبیعی و تغییر آن، روشی جهت پیدا کردن عیوب ارائه گردد. با توجه به ارتباط جرم و سفتی در تعیین فرکانس طبیعی، به جای ایجاد عیب (کاهش سفتی) از افزایش جرم استفاده شده است. روش ارائه شده شامل مدل سازی لوله ۲ اینچی به طول ۲ متر در نرم افزار آباکوس و بررسی فرکانسهای طبیعی لوله در حالت سالم و دارای عیب (ایجاد ترک) است. سپس نسبت به تعیین جرم معادل برای مدل سازی عیوب اقدام شده است و در ادامه لوله فوق تحت آنالیز مودال تجربی قرار گرفت و با ایجاد عیوب مصنوعی (افزودن جرم)، حالت های مختلف آن آزمایش گردید. سپس از اطلاعات به دست آمده در آموزش شبکه عصبی پرسپترون در محیط نرم افزار متلب استفاده شده است و خروجی برنامه مکان عیب و شدت آن (مقدار جرم) می باشد.
کلیدواژگان لوله گاز آباکوس فرکانس طبیعی شبکه های عصبی عیب یابی	

Damage detection in gas transmission lines based on natural frequency changes via artificial neural networks

Ali Asghar Binaieyan¹, Ehsan Jamshidi^{2*}, Alireza Arghavan²

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

* P.O.B. 123456789 Semnan, Iran, Ehsan.jamshidi@gmail.com

Article Information

Original Research Paper

Received: 8 April 2018

Accepted: 10 June 2018

Available Online 6 August 2018

Keywords

Gas pipe

Abaqus

Natural Frequency

Neural Network

Fault Detection

ABSTRACT

The purpose of this paper is to introduce a new approach for troubleshooting of gas pipelines using mechanical waveforms. In this paper, an attempt has been made to determine the defects by using natural frequency characteristics and changes. Due to the relationship between mass and stiffness in determining the natural frequency, a mass increase has been used instead of the reduction of stiffness. The proposed method involves modeling a 2-inch pipe with a length of 2 m in the Abaqus software and examining the natural frequencies of the pipe in a state of intact and defective (cracking). Then, an equivalent mass value was applied to model the defects. Subsequently, the pipe was subjected to experimental modal analysis and various conditions were tested by creating artificial defects (adding mass). Then, the obtained information was used in the study of the perceptron neural network in MATLAB software, and the program output is the defect location and its severity (mass value).

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Ali Asghar Binaieyan, Ehsan Jamshidi, Alireza Arghavan, Diagnosis of damage in gas transmission lines based on natural frequency changes through artificial neural networks, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 9, No. 2, pp. 7-13, 2018 (In Persian)

۱- مقدمه

سازه های مهندسی در تقابل با محیط معمولاً دچار خوردگی می شوند که این اثر در خواص مکانیکی و خواص فیزیکی آنها تغییرات مهمی ایجاد می کند. اکثر نواقص در سازه، مثل ترک، خستگی، خوردگی و نقص در اتصالات رزوه ای به طور مشخص سفتی را کاهش می دهد و با توجه به اینکه تغییرات جرم قابل اغماض است این عیوب سبب تغییر خواص (ارتعاش خطی) مودال سازه شامل فرکانس طبیعی، ضریب میرایی، شکل مود و توابع پاسخ فرکانسی می شود که با استفاده از این مشخصات می توان سلامت سازه را بررسی کرد.

تفاوت میان مانیتور کردن هوشمند سلامت خطوط لوله با عیب یابی اینست که قبل از بروز عیب جدی یا خسارت لوله ها از وقوع عیوب بزرگ و ازکار افتادن سیستم پیشگیری می شود که می تواند به عمر مفید لوله بیافزاید.

افزایش بار اعمالی به سازه ها، پیچیدگی مضاعف در طراحی و توجه به دوام و عمر طولانی تر سازه ها چه در حیطه راه و ساختمان، اجزا و قطعات مکانیکی و سازه های هوا فضایی، اهمیت مبحث نظارت بر سلامت سازه ها را بیش از پیش برجسته می سازد. طیف گسترده ای از تکنیک های بسیار موثر و غیر مخرب با بهره گیری از کرنش سنج ها، سیالات نافذ، امواج ماوراء صوت، بازرسی های چشمی و غیره همه و همه روش های در دسترس برای شناسایی عیوب هستند. اما متأسفانه همگی این روش ها موضعی، نیازمند مجال طولانی و پر هزینه برای بازرسی هستند علاوه بر اینکه گاهی برخی از اجزا فقط به علت خارج از دسترس بودن نمی توانند مورد بازرسی و صحت قرار گیرند و این خود منجر به گسترش عیوب حتی تا سطوح بحرانی در فاصله زمانی بین بازرسی ها میگردد. شاخصه مهم تکنیک بازرسی مورد بحث این است که به مهندسین این امکان را می دهد که متد های جدیدی را به منظور نظارت پیوسته و برآورد شرایط کلی سازه جستجو کنند. متدهایی که براساس پاسخ ارتعاشی پایه، پایه گذاری شده اند، این امکان را فراهم میکنند تا داده هایی پر معنا از حوزه زمان و یا فرکانس را بدست آورده و به محاسبه تغییرات در ویژگیهای سازه ای و مودال همچون فرکانسهای تشدید، دمپینگ و شکل مودها پرداخته و از آنها برای توسعه تکنیک های قابل اعتماد برای تشخیص، موقعیت یابی و کمی سازی عیوب بهره گیریم.

این پروژه شامل مدل سازی یک قطعه لوله ۲ اینچی به طول مشخص در نرم افزار آباکوس ۳،۱۲،۶ است. در نرم افزار اجزاء محدود مدل اجزاء استخراج می شود. و برای تایید و اعتبار سنجی به مدل اجزاء محدود، قطعه تحت تست مودال قرار گرفته و بعد از تایید مدل شبیه سازی جرمهای اضافه شده به لوله روی مدل اجزاء محدود انجام می شود. در مرحله بعد با استفاده از تکنیک های آماری داده های بدست آمده در شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین مکانی عیب و شدت آن استفاده می شود. در این پروژه عمده بحث در بررسی تغییرات فرکانس طبیعی می باشد. و با توجه به اینکه در لوله حین کار نمیتوان عیب ایجاد نمود از افزودن جرم که خاصیت کاهش سفتی سیستم را دارد، استفاده میشود.

۱-۲- اشاره به مراجع

محققان متعددی اثرات عیب بر روی رفتار ارتعاشی سازه ها را مورد بررسی قرار داده اند.

علی جودکی و همکاران با استفاده از ایجاد عیب و مقایسه ارتعاشات لوله سالم و دارای عیب با یکدیگر و استفاده از شبکه عصبی مصنوعی نسبت به بررسی موضوع پرداختند. [۱]

دوسانتوس و همکاران بررسی عیب بر اساس ارتعاش در پره اصلی هلی کوپتر را انجام داده اند که عیوب به صورت مجازی با قرار دادن اجسام کوچک روی پره ایجاد شده است. [۲]

K.He و همکاران در سه سازه: تاور روشنایی، اسکلت ساختمان و خط لوله تعیین عیوب بر اساس ارتعاش را بررسی کرده اند و با وجود عیب نسبت به تغییر فرکانس طبیعی پرداخته اند و در آن تعیین عیب و محل آن به خوبی به دست آمده است. [۳]

رضایی و همکاران رفتار ارتعاشی تیر یکسر گیردار کوتاه ترک دار را تحت نیروی محوری بررسی کرده اند. و جهت عیب یابی از روش معکوس مشخصه های ارتعاشی استفاده کرده اند و موقعیت و عمق ترک را تعیین کرده اند. [۴]

دوکا و همکاران تاثیر ترک باز را روی تیر با تکیه گاه های متفاوت به صورت تجربی و تئوری بررسی کرده اند و در تجربی نیز بر روی تیری از جنس pleiglas آزمایشهای خود را انجام داده اند. [۵]

Kai.zhang و همکاران بر روی تیری که سطح مقطع متغیر دارد به صورت تجربی و تئوری بررسی خود را انجام داده اند و به این نتیجه رسیده اند که با این روش می توان با دقت خوبی

سپس حالت‌های مختلف ترک در لوله در نرم افزار شبیه سازی شده اند و نتایج آنها در جدول شماره ۳ مشخص است .

۲-۱- فرکانسهای طبیعی لوله ترک دار

جهت ایجاد ترک در لوله در محیط نرم افزار از دو حالت استفاده گردید از ابزار ترک نرم افزار و حالت دوم ایجاد ترک در قطعه به صورت برش ضخامتی از لوله ، و با توجه به نتایج مشخص گردید ، نحوه تعریف ترک برای این حالت بررسی مساله در نتایج خیلی تغییر محسوسی ندارد.

چهار حالت ترک در قطعه به صورت seam ایجاد شده است:

- ۱- وسط لوله به اندازه نصف محیط دایره
- ۲- وسط لوله به اندازه ربع محیط دایره
- ۳- ابتدای لوله به اندازه نصف محیط دایره
- ۴- ابتدای لوله به اندازه ربع محیط دایره

جدول ۳ نتایج تاثیر ترک در فرکانسهای طبیعی

فرکانس حالت	۱	۲	۳	۴
اول	۷۲,۷۹	۸۸	۸۶,۹۵	۹۰,۲۶
دوم	۲۴۵,۹	۲۴۷	۲۱۴	۲۴۳,۲۱
سوم	۴۲۴	۴۶۸,۱۱	۴۰۹	۴۶۵,۷۲
چهارم	۷۰۱,۶۳	۷۷۳	۷۶۸	۷۶۰

۲-۲- معادل سازی جرم با ترک :

همانطور که قبلا عنوان شد ، میتوان کاهش سفتی سیستم را با افزودن جرم در آن شبیه سازی کرد و برای حالت اول ترک با توجه به نتایج جدول شماره ۴ ، حدود ۵ کیلوگرم جرم نیاز است تا حدودا به مقادیر کاهش یافته حاصل از ترک به دست آید که نتایج آن در جدول شماره آمده است .

جدول ۴ فرکانسهای طبیعی با افزودن ۵ کیلوگرم جرم

فرکانس	مقدار
اول	۷۶
دوم	۲۴۶
سوم	۴۰۶

۳- انجام آزمایش در کارگاه و آنالیز مودال

جهت انجام آزمایش سه شاخه لوله ۲ متری از انبار شرکت گاز استان سمنان انتخاب گردید و پس از آماده سازی سطوح و زنگ زدایی هر شاخه به ۱۰ قسمت مساوی تقسیم و علامت

مشخصه های ترک از قبیل موقعیت و عمق آن را تعیین نمود. [۶]

هانسن و همکاران به بررسی و تعیین عیب به روش OMA در سازه framework با انجام آزمایش تجربی و روشهای عددی پرداخته اند. ستار محمدی و همکاران تاثیر عیوب و درجه حرارت را بر فرکانسهای طبیعی مورد بررسی قرار داده اند و مهمترین نتیجه ای که به آن رسیده اند ، اینست که تاثیر عیوب بر مشخصه های دینامیکی کمتر از تاثیر تغییرات درجه حرارت هست و این اولین مطالعه در این زمینه در خصوص تخمین عیب و درجه حرارت به صورت همزمان است. [۷]

دانگشن و همکاران تشخیص عیوب در لوله بر اساس جرمهای اضافی مجازی که به سیستم وارد می شود را بررسی کرده اند. [۸]

Panopoulou و همکاران به بررسی سیستم مانیتور کردن سلامت سازه کامپوزیتی هوا فضایی بر اساس اندازه گیری کرنش دینامیکی و آنالیز مودال پرداختند و از سنسورهای FBG برای مانیتور کردن رفتار دینامیکی استفاده کرده اند .سازه یک آنتن سبک وزن انتخاب شده است و عیوب نیز بر اساس اضافه کردن جرم به نقاط مختلف سازه شبیه سازی کرده اند و از شبکه عصبی جهت تعیین محل و مقدار عیب استفاده شده است و پایه شبکه عصبی نیز از مقادیری که آزمایش تجربی استخراج شده اند ، ایجاد شده است. [۹]

۲- آنالیز لوله در نرم افزار المان محدود

لوله با مشخصات جدول شماره ۱ در نرم افزار تحلیل شده است و نتایج آن در جدول شماره ۲ آمده است .

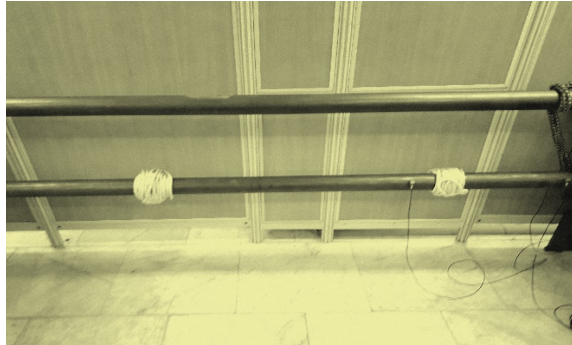
جدول ۱ مشخصات لوله مورد آزمایش

مشخصات	مقدار
طول	۱,۹۹۵ متر
چگالی	۷۸۶۱ کیلوگرم بر مترمکعب
مدول الاستیسیته	۲۰۷ GPa
ضریب پواسان	۰,۳

جدول ۲ نتایج تحلیل لوله سالم در نرم افزار

فرکانس	مقدار
اول	۹۰,۶۶
دوم	۲۴۷,۳۵
سوم	۴۷۷,۷
چهارم	۷۷۴,۶۵

حالت های ایجاد شده در قطعه و مقدار جرم اضافه شده به سیستم در هر حالت در جدول شماره ۶ ذکر شده است. حداکثر دو عیب در طول دو متری در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ نحوه افزودن وزنه به سیستم

جدول ۶ حالت های انجام آزمایش

حالت	المان اول	مقدار جرم اضافه شده	المان دوم	مقدار جرم اضافه شده
۱	-	۰	-	۰
۲	۱۰	۶۸۰	-	۰
۳	۴	۱۰۰۰	-	۰
۴	۹	۱۳۰۰	-	۰
۵	۸	۱۳۰۰	۱۰	۶۸۰
۶	۸	۱۳۰۰	-	۰
۷	۷	۱۳۰۰	-	۰
۸	۶	۱۰۰۰	۹	۱۳۰۰
۹	۶	۱۰۰۰	-	۰
۱۰	۶	۶۸۰	۷	۱۳۰۰
۱۱	۶	۶۸۰	-	۰
۱۲	۵	۱۳۰۰	۶	۱۰۰۰
۱۳	۵	۱۳۰۰	-	۰
۱۴	۵	۵۴۰	۱۰	۶۸۰
۱۵	۵	۵۴۰	-	۰
۱۶	۳	۹۴۰	۴	۱۰۰۰
۱۷	۲	۱۳۰۰	۶	۶۸۰
۱۸	۲	۱۳۰۰	-	۰
۱۹	۳	۶۸۰	۴	۱۰۰۰
۲۰	۳	۶۸۰	۷	۱۳۰۰
۲۱	۳	۶۸۰	۹	۱۳۰۰
۲۲	۳	۶۸۰	-	۰
۲۳	۳	۹۴۰	۸	۱۳۰۰
۲۴	۳	۹۴۰	-	۰
۲۵	۴	۱۰۰۰	۵	۱۳۰۰

گذاری شدند. و سپس لوله ها با شرایط آزاد با کمک کش به صورت معلق ، همانند شکل شماره ۱ قرار گرفتند و ابتدا آنالیز مودال جهت بدست آوردن شکل مود و فرکانس های طبیعی بر روی لوله انجام گردید . شتاب سنجها در روی لوله و در گره های دو و چهار قرار گرفتند و لوله به وسیله چکش در ۱۱ نقطه به صورت افقی و عمودی مورد تحریک قرار گرفت و میانگین ضربات در نرم افزار ۱۰ عدد تنظیم گردید . نتایج این آزمایش در جدول شماره ۵ مشخص هستند . با مقایسه این نتایج با داده های نرم افزار مشخص است آزمایش روند خوبی را طی می کند و این اعداد به هم نزدیک هستند و شکل مود ها نیز بر هم منطبق هستند .



شکل ۱ نحوه آماده سازی آزمایش

۳-۱- آزمایش لوله با افزودن جرم

جهت ساخت شبکه عصبی لازم است اطلاعات لازم به شبکه تزریق شود و از این داده ها جهت تعیین مکان عیب استفاده کرد. همانطور که قبلا عنوان گردید برای شبیه سازی ترک در نقاط مختلف لوله ، از افزودن جرم استفاده می شود که در این بخش ۲۴ حالت افزودن جرم در قسمتهای مختلف لوله انجام گردید و لوله تحت آزمایش Operational modal قرار گرفت و نتایج آن جهت تغذیه شبکه استفاده می گردد و داده های دو حالت نیز جهت ارزیابی شبکه و بررسی صحت کارکرد شبکه به کار خواهند رفت .

جهت افزودن جرم به لوله شکل شماره ۲ از نوارهای سربی استفاده شده است که به دور لوله پیچیده شده و با چسب نواری کاملا به لوله محکم می گردند.

در این حالت آزمایش از روش Operational Modal Analysis (OMA) استفاده شده است و ضربات چکش به صورت رندوم و ناشناخته به سیستم وارد می شوند.

۴- شبکه عصبی

در این تحقیق از شبکه پرسپترون استفاده شده است و در شکل شماره ۶-۱ مشخصات آن مشهود است. ورودی شبکه سه متغیر و تغییرات سه فرکانس اول طبیعی است و خروجی آن دو متغیر و در دو قسمت دو تایی مجزا در داخل برنامه، المان لوله و مقدار عیب (وزن متناظر) است. شبکه از دو لایه تشکیل شده است و تابع فعال هر دو لایه tansig است. شبکه همانطور که در شکل شماره ۳ مشخص است، در لایه ورودی ۱۰ نورون و در لایه خروجی ۲ نورون دارد که در لایه خارجی می بایست، تعداد نورون ها متناسب با تعداد خروجی باشد.

تغییرات نرمال شده هر حالت با توجه به فرکانس سالم آن محاسبه شده و به عنوان ورودی و حالت عیب (حداکثر دو عیب به صورت شماره المان دارای عیب و مقدار عیب) نیز به عنوان تابع هدف به شبکه عصبی تزریق شده است. و برای اعتبار سنجی نیز که دو حالت در نظر گرفته شده بود، تغییرات فرکانس به عنوان ورودی و شماره المان و مقدار عیب (جرم اضافه شده به المان) از آن استخراج شده است.

حالت اول اعتبار سنجی :

جدول ۷ حالت اول (مقادیر واقعی جهت اعتبار سنجی)

فرکانس	تغییرات فرکانس	شماره المانی که جرم اضافه شده است	مقدار جرم اضافه شده (kg)
اول	-0.06242	8	1.3
دوم	-0.14999	10	0.680
سوم	-0.03874		

خروجی برنامه جدول شماره ۸ می باشد

جدول ۸ خروجی برنامه برای حالت اول با استفاده از داده های

تجربی

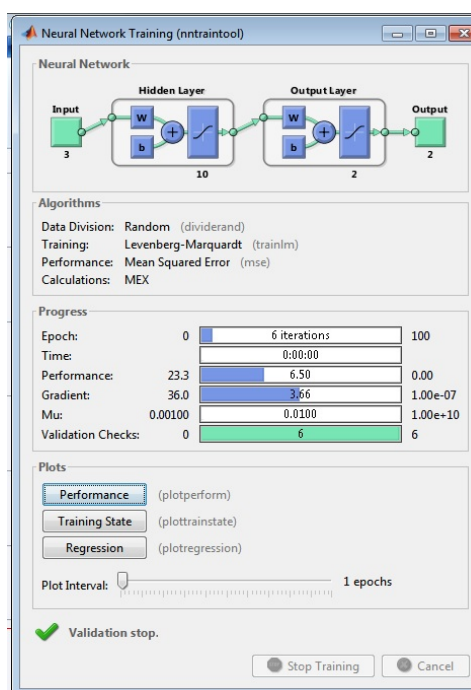
شماره المانی که جرم اضافه شده است	مقدار جرم اضافه شده (kg)
7	1.2805
10	0.5943

حالت دوم اعتبار سنجی :

جدول ۹ حالت دوم (مقادیر واقعی جهت اعتبار سنجی)

فرکانس	تغییرات فرکانس	شماره المانی که جرم اضافه شده است	مقدار جرم اضافه شده (kg)
اول	-0.01483	2	1.3
دوم	-0.00972	0	0
سوم	0.02900	7	

خروجی برنامه جدول شماره ۱۰ می باشد :



شکل ۳ شبکه عصبی استفاده شده

۵- نتایج

با توجه به آزمایشهای انجام شده در ۲۴ حالت و وجود حداکثر دو عیب در محدوده لوله ۲ متری، مقادیر به دست آمده در دو بخش تقسیم شدند و ۲۲ حالت برای ساخت و آموزش شبکه عصبی و ۲ حالت برای اعتبار سنجی شبکه استفاده شده اند.

در فرکانس های اندازه گیری شده، تغییرات در سه فرکانس اول بیشتر از بقیه می باشد و لذا از آنها برای تجزیه و تحلیل استفاده شده است.

جدول ۱۴ خروجی برنامه برای حالت دوم با استفاده از داده های

نرم افزار آباکوس	
مقدار جرم اضافه شده (kg)	شماره المانی که جرم اضافه شده است
1.3	2.1648
0	0

با توجه به مقادیر به دست آمده میانگین خطا با استفاده از داده های تجربی در پیدا کردن محل عیب ۳,۸٪ و در محاسبه مقدار جرم (عیب) ۴,۹٪ است.

۶- نتیجه گیری

همانطور که مشاهده می شود ، خطای کم و قابل قبولی در محاسبات وجود دارد و این روش می تواند به عنوان یک روش مناسب عیب یابی با استفاده از تغییرات فرکانس طبیعی استفاده شود. بدیهی است برداشت اطلاعات لوله سالم و همچنین اثر عیب با استفاده از شبیه سازی (افزودن جرم) در آن به عنوان یک معیار الزامی است و هرچه وسایل اندازه گیری نیز دقیق تر باشند، نتایج به واقعیت نزدیکتر خواهد بود.

۷- فهرست مراجع

- [۱] ع. جودکی، مدلسازی لوله های انتقال گاز با شبکه های عصبی مصنوعی به منظور تشخیص عیوب آنها، ۱۳۹۳.
- [2] F. dos santos, B. Peeters, H. van der auwraer, L. Goes و W. Desmet, "Vibration-based damage detection for composite helicopter main rotor blade," ELSEVIER, pp. 22-27, 2016 .
- [3] W. Zhu, K. He, "structural Damage Detection Using Changes In Natural Frequencies:Theory and Applications," Iop Vol 305, 2011
- [۴] م. رضائی، ح. جوادیان و و. عرب ملکی، "بررسی رفتار ارتعاشی و عیب یابی تیر کوتاه یکسر گیردار ترک دار تحت نیروی محوری"، نشریه علمی پژوهشی امیر کبیر، جلد ۴۷، شماره ۲، صفحه ۱۰-۱۰، ۱۳۹۴.
- [5] Y. Bamnios, E. DoukaA. Trochidis, "crack identification in beam structures using mechanical impedance," journal of sound and vibration, pp. 287-297, 2002 .
- [6] K. zhang, X. Yan, "Multi-cracks identification method for cantilever beam structure with variable cross-sections based on measured natural ferquency changes," Jouranal of sound and vibration, 2016 .
- [7] J. B. Hansen, R. Brincker, M. Lopez-Aenlle, C. F. Overgaard and K. Kloborg, "A new scenario-based approach to damage detection using operational modal parameter estimates," Mechanical systems and signal processing, vol. 94, pp. 359-373, 2017 .
- [8] S. M. Esfarjani, M. Salehi and A. Ghassemi, "Effect of the multiple damages and temperature changes on the natural frequency," Journal of theortical and applied mechanics, Vols. 55,3, pp. 813-822, 2017 .

جدول ۱۰ خروجی برنامه برای حالت دوم با استفاده از داده های

تجربی	
مقدار جرم اضافه شده (kg)	شماره المانی که جرم اضافه شده است
1.2263	1.9423
0	0.0013

نتایج حاصل از داده های شبیه سازی شده در نرم افزار آباکوس نیز به صورت جدولهای شماره ۱۲ و ۱۴ می باشد و همانطور که مشخص است چندان اختلافی با اعداد تجربی ندارند.

حالت اول:

جدول ۱۱ داده های نرم افزار آباکوس برای حالت اول

فرکانس	تغییرات فرکانس	شماره المانی که جرم اضافه شده است	مقدار جرم اضافه شده (kg)
اول	-0.05779	8	1.3
دوم	-0.09423	10	0.680
سوم	-0.07616		

خروجی برنامه به شکل زیر می باشد

جدول ۱۲ خروجی برنامه برای حالت اول با استفاده از داده های

نرم افزار آباکوس

مقدار جرم اضافه شده (kg)	شماره المانی که جرم اضافه شده است
1.2995	6.9915
0.6677	10

حالت دوم:

جدول ۱۳ داده های نرم افزار برای حالت دوم

فرکانس	تغییرات فرکانس	شماره المانی که جرم اضافه شده است	مقدار جرم اضافه شده (kg)
اول	-0.01634	2	1.3
دوم	-0.00394	0	0
سوم	-0.03638		

خروجی برنامه به شکل زیر می باشد

- [9] L. Dongsheng, L. Dang and H. Jilin, "Pipeline Damage Identification Based on Additional Virtual Masses," MDPI, 2017 .
- [10] A. Panopoulou, S. Fransen, V. Gomez-Molinero and V. Kostopoulos, "Experimental modal analysis and dynamic strain Bragg gratings for structural health monitoring of composite antenna sub-reflector," CEAS, vol. 5, pp. 57-73, 2013