

## طراحی و ساخت دستگاه تحریک کننده پنوماتیک متحرک برای شناسایی و تحلیل رفتار سازه‌ها در فرکانس‌های متغیر

فیروز بختیاری نژاد<sup>۱\*</sup>، میثم میرزایی<sup>۲</sup>، مهدی وهابی<sup>۳</sup>، امیر ابوالفضل صورتگر<sup>۴</sup>

\* نویسنده مسئول: baktiari@aut.ac.ir

### واژه‌های کلیدی

تحریک کننده، پنوماتیک، متحرک، نیروی ضربه‌ای، نیروی هارمونیک، فرکانس طبیعی.

### چکیده

برای شناسایی و تحلیل ارتعاشی سازه‌ها اندازه‌گیری حداقل چند فرکانس طبیعی اول و شکل مودهای مربوطه ضروری است. اندازه‌گیری چند شکل اصلی مودها مستلزم نصب چند حساسه در نقاط شکمی سازه و تحریک یک نقطه از سازه و یا نصب یک حساسه و تحریک همزمان چند نقطه مشخص است. هر دو روش مستلزم داشتن تعداد زیادی حساسه شتاب و یا نیرو است. تحریک سازه می‌تواند توسط ضربه چکش، تحریک کننده‌های الکترو مغناطیس، آکوستیک و یا لیزری باشد. روش دیگر در اندازه‌گیری شکل مودها که نیازمند فقط یک حساسه نیرو و یک حساسه شتاب است، تحریک کننده متحرک برای اعمال انواع بارهای متحرک است. اعمال نیرو در تحریک کننده متحرک می‌تواند از انواع الکترومغناطیس، هیدرولیک و یا پنوماتیک باشد. روش پنوماتیکی به علت پاکی و دقت می‌تواند از کارایی خوبی برخوردار بوده و برای ایجاد تحریک غیر تماسی مورد استفاده قرار گیرد. این نوع اعمال کننده نیرو که برای تحلیل سازه‌های حساس و شکننده که انواع دیگر تحریک کننده‌ها نظیر تحریک با چکش و تحریک تماسی الکترومغناطیس عملکرد مناسبی ندارند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، طراحی و ساخت دستگاه تحریک کننده پنوماتیک متحرک برای تحریک یک تیر با اعمال نیروهای ضربه‌ای، بار ثابت پله‌ای یا شیب و یا هارمونیک در سرعت‌های متغیر ارائه و عملکرد تحریک کننده با ایجاد تحریک بر روی یک تیر بررسی و با نتایج نظری مقایسه شده است.

۱- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۳- دانشجوی کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۴- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

## ۱- مقدمه

مبحث ارتعاشات دارای شاخه‌های زیادی است که از جمله‌ی آن‌ها ارتعاشات سیستم‌های پیوسته است. از آنجا که سیستم‌های پیرامون ما اغلب به صورت پیوسته بوده و موقعی نیز امکان مدل‌سازی آن‌ها به صورت گسسته و جرم متمرکز وجود ندارد، بررسی ارتعاشات سیستم‌های پیوسته از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. از انواع سیستم‌های پیوسته می‌توان به ساختمان‌ها، دکل‌ها و پل‌ها اشاره کرد.

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری فرکانس‌ها و شکل‌مادهای طبیعی یک سیستم ارتعاشی رایج است. از انواع روش‌های تحریک نظیر نیروی هارمونیک، ضربه و نیروی اتفاقی و نظایر آن‌ها خواه به صورت تماسی و خواه به صورت غیر تماسی برای به ارتعاش در آوردن سیستم و از انواع روش‌ها و لوازم اندازه‌گیری نظیر شتاب‌سنج‌ها، حسگرهای سرعت، تغییر مکان، صوت و غیره از نوع تماسی و غیر تماسی برای دریافت و ثبت پاسخ آن استفاده می‌شود. در هر حال سیستم در یک یا چند نقطه از آن تحریک شده و پاسخ از یک یا چند نقطه آن دریافت می‌شود. از آنالیز دینامیکی تحلیلی همیشه نتایج دقیق به دست نمی‌آید که این امر ناشی از شرایط مرزی غیر دقیق و ناتوانی در پیشگویی میرایی سیستم است. معمولاً از آنالیز تجربی برای شناسایی مشخصه‌های ارتعاشی یک سیستم مکانیکی استفاده می‌شود.

استفاده از تحریک کننده الکترومغناطیسی در آنالیز تجربی، انرژی را بهتر منتقل می‌کند، اما مشکلات مرتبط با نصب الکترومغناطیس و لزوم استفاده از سنسور نیرو را به همراه دارد، از دیگر مشکلات اتصال الکترومغناطیس به یک سازه تغییراتی است که در دینامیک سازه ایجاد می‌کند. علاوه بر آن به سبب عدم تطابق مقاومت ظاهری بین سازه و الکترومغناطیس، نیروی ایجاد شده از طرف الکترومغناطیس بر سازه در حال استفاده به حدی وارد می‌شود که فرکانس را تا فرکانس تشدید پائین آورده و یک سیگنال نویزی را در همسایگی این فرکانس تولید نماید. یکی دیگر از راه‌های محاسبه رفتار دینامیکی سازه‌ها استفاده از ضربه چکش است [۱]، در این نوع تحریک، شخص استفاده کننده ضربه‌هایی را در چندین نوبت به سازه وارد می‌کند. در انتها با معدل گیری از ضربات صورت گرفته

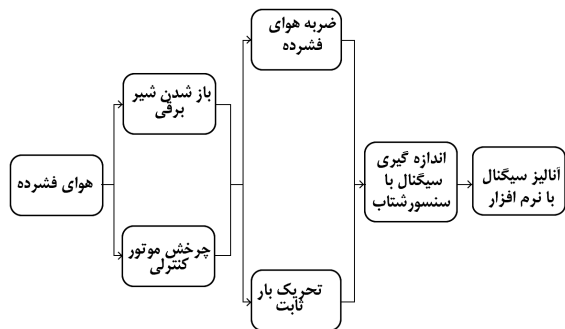
توسط شخص تحریک کننده، خطاهای دینامیکی سازه‌ها محاسبه می‌شود [۲]. ضربه چکش در مبحث آنالیز تجربی می‌تواند در بسیاری از موارد کاربردی باشد [۱]. ضربه چکش می‌تواند باعث ایجاد نیروی بیش از حد شود، که این امر ممکن است به سازه‌های حساس آسیب وارد کند که نتیجه آن تغییر شکل پلاستیک یا شکست است. مضاف بر آن، تماس مستقیم ضربه چکش می‌تواند باعث آلودگی بیولوژیکی در ابزار پزشکی شود. برای مثال در بیوپزشکی کاربرد آن طوری است که تماس مستقیم چکش برای جلوگیری از بیماری، اجزاء استریل شده‌ای را می‌طلبد. در ارتعاشات غیر تماسی مخصوصاً زمانی که سازه‌ها شکننده، ترد و حساس مد نظر باشند تحریک کننده پنوماتیک بسیار مفید است [۲]. نیروهای متفاوتی برای تحریک سازه‌ها وجود دارند که در آنالیز تجربی غیر تماسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال می‌توان به تحریک کننده‌های آکوستیک، لیزری و آهنربایی اشاره کرد. متأسفانه این نوع تحریک کننده‌ها نیز دارای محدودیت‌هایی در فرکانس‌های پائین و نیروی با سطح پائین و کم هستند (تحریک آکوستیک و لیزری به ترتیب) یا قابل استفاده برای سازه‌های غیر فلزی نیستند (تحریک آهنربایی). در این تحقیق طراحی و ساخت تحریک کننده پنوماتیک متحرک انجام شده و آنالیز تئوری و تجربی برای تیر دو سر گیردار به صورت تحریک ضربه، هارمونیک و با بار ثابت در سرعت‌های مختلف بررسی شده است. تحریک ثابت به وسیله شیر برقی توسط نازل انجام می‌گیرد و جابه‌جایی نازل نیز توسط موتور طراحی شده در پریدهای زمانی مختلف کنترل می‌شود.

## ۲- آنالیز دینامیکی غیر تماسی

در این بخش به بررسی و تشریح ساخت دستگاه تحریک کننده پنوماتیک متحرک می‌پردازیم. شماتیک و نمای دستگاه را در شکل (۱) ارائه شده است.

تحریک هوا با فشار ثابت اما در سرعت‌های متغیر باعث ارتعاش سازه می‌شود و اطلاعات مورد نیاز در مورد جابه‌جایی و انحراف تیر دو سر گیردار از طریق شتاب سنج دریافت می‌شود. نتایج به دست آمده از آزمایش با حالت تئوری مقایسه می‌شود.

را از طریق اتصال تی شکل به تیر وارد می کند. هوای خارج شده باعث تحریک تیر شده و ارتعاشات تیر به وسیله سنسور شتاب اندازه گیری می شود. اندازه فشار خروجی از نازل وسط سنسور فشار تخمین زده می شود.



شکل (۲) دیاگرام عملکرد دستگاه.

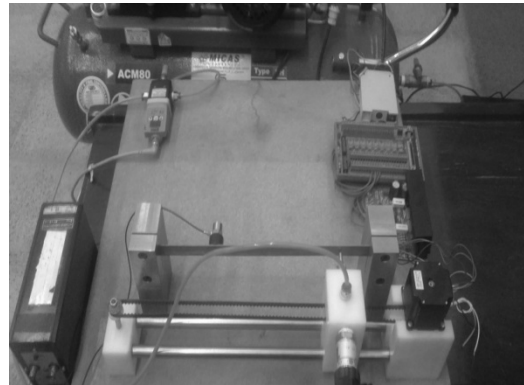
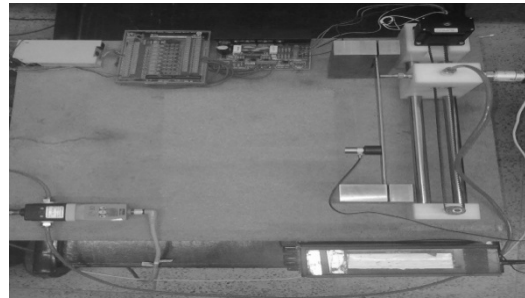
#### ۴- تحریک کننده هوا

پارامترهایی مانند فشار، فاصله و خصوصیات نازل نیروی وارد شده بر تیر تأثیرگذارند. تحریک هوا به وسیله فشار هوای ذخیره شده در داخل منبع کمپرسور و کنترل آن توسط شیر برقی انجام می پذیرد. کالیبره کردن هوای خروجی از نازل تابع نیرویی مناسبی را مشخص می کند. با توجه به آنکه نیروی وارد بر تیر باید دارای فرکانس خاص باشد تا مود شیب مورد نظر را تشکیل دهد دستگاه به کالیبره کردن نیاز دارد [۱]. با اندازه گیری فشار و محاسبه مساحت و زاویه سطح هدف، نیروی مورد نیاز به دست می آید. شکل (۳) شماتیکی از زاویه پخش کنندگی جریان آرام هوا را نشان می دهد.  $Lg$  فاصله بین نازل و تیر است. قطر نازل  $Dn$  و قطر هدف  $Ds$  هستند. زاویه پخش کنندگی جریان آرام برای نسبت تجربی مورد نیاز  $0.2$  رادیان گزارش شده است [۱]. نسبت جریان جرمی از طریق فرمول (۱) و (۲) به دست می آید که به وسیله مشخصات شیر برقی آن را می توان محاسبه کرد [۱]:

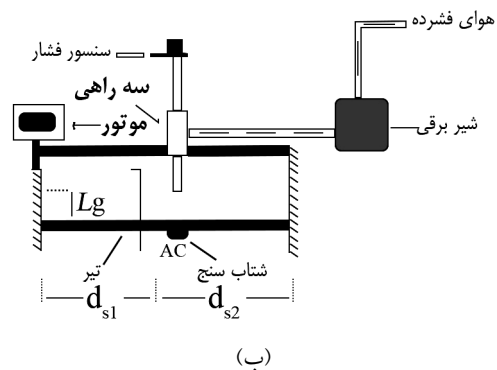
$$\dot{m} = Cpu \rho_o \sqrt{\frac{293}{Tu}} \sqrt{1 - \left( \frac{Pd / Pu - b}{(1-b)} \right)^2} \quad (1)$$

$$\text{if } Pd / pu \geq b$$

$$\dot{m} = Cpu \rho_o \sqrt{\frac{293}{Tu}} \quad \text{if } Pd / pu \leq b \quad (2)$$



(الف)



(ب)

شکل (۱) مدل تحریک کننده متحرک

(الف) عکس دستگاه (ب) نمای دستگاه.

#### ۳- بستر آزمایشگاهی غیر تماسی

دستگاه ساخته شده برای بررسی دینامیک تیر دو سر گیردار، به وسیله تحریک ضربه هوا، بار هارمونیک یا بار ثابت در حال حرکت و با استفاده از سنسور شتاب سنج طراحی شده است. دیاگرام عملکرد دستگاه در شکل (۲) مشاهده می شود. هوای فشرده داخل یک منبع کمپرسور ذخیره شده و به وسیله یک شیر برقی کنترل شده و از طریق نازل تعبیه شده بر روی لغزنده به سمت تیر هدایت می شود. نازل دقیقاً روبه روی تیر قرار گرفته و آن را تحریک می کند. شیر برقی هوای فشرده

ایجاد نماید که حدوداً  $100\text{ Hz}$  است. گزینه دیگر برای انتخاب شیر، شیرهای روشن و خاموش می‌باشد. این نوع شیرها قادر هستند که تحریک را بصورت غیر مداوم و در حدود  $1\text{ms}$  قطع و وصل نمایند. این نوع شیر نیاز به دراپوری برای ایجاد سیگنال برای باز و بسته شدن دارد. شیر انتخاب شده برای ساخت تحریک کننده متحرک، دارای خصوصیتی مانند پاسخ سریع به پالس ورودی، ایجاد فرکانس بالا، خصوصیات کنترلی بهتر و ایجاد فشار  $0$  تا  $9\text{ bar}$  است [۲].

### ۵- بخش متحرک دستگاه آزمایش

طراحی و ساخت بخش متحرک دستگاه به دو قسمت اصلی برای حرکت تقسیم می‌شود که عبارت‌اند از: موتور پله‌ای ثابت شده بر روی یک وسیله ثابت و تسمه و پولی، موتور به وسیله این تسمه لغزنده را که بر روی دو میله راهنما قرار دارد به حرکت در می‌آورد. پارامترهای تأثیرگذار برای حرکت موتور، اصطکاک بین میله راهنما و لغزنده است. برای طراحی تسمه و پولی مورد نیاز باید براساس مشخصه‌های موتور عمل کرد. موتور مورد استفاده توسط دراپور به حرکت در آمده و دارای ماکزیمم فرکانس  $500$  هرتز و گشتاور خروجی  $0.55\text{ N.m}$  است. نیروی به دست آمده برای موتور باید از حداقل نیروی لازم جهت جابه‌جایی لغزنده بزرگتر باشد، این حداقل نیرو که در رابطه (۷) به دست آمده، نیروی غلبه بر اصطکاک بین لغزنده و میله راهنما است. [۶-۷]

$$F_m = F_{f_1} = \mu mg \quad (7)$$

که در رابطه فوق  $F_m$  نیروی اعمال شده موتور به لغزنده،  $F_{f_1}$  نیروی اصطکاک اعمال شده به لغزنده،  $\mu$  ضریب اصطکاک بین ریل و لغزنده،  $m$  مجموع جرم اجزاء متحرک،  $g$  شتاب ثقل است. حداقل گشتاور لازم برای جابه‌جایی لغزنده به وسیله رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$T_m = F_m r = 0.43\text{ N.m} \quad (8)$$

با توجه به نتایج به دست آمده گشتاور خروجی موتور از حداقل گشتاور لازم جهت جابه‌جایی اجزاء متحرک بزرگ تر است. برای انتخاب تسمه و پولی‌های مورد استفاده توان از رابطه (۹) به دست می‌آید. [۸]

$$P = F_m V \quad (9)$$

که در آن  $Pd$  فشار پائین و  $Pu$  فشار بالا،  $Tu$  دمای بالا در مقیاس کلوین،  $\rho_0$  چگالی محیط،  $b$  نسبت فشار بحرانی و  $c$  نسبت جریان جرمی مخصوص شیر برقی است. نسبت فشار بحرانی و فشار اولیه برای نازل از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$b = \frac{Pd}{Pu} = \frac{2}{(n+1)^{(n/n-1)}} \quad (3)$$

$n$  برای هوا  $1/4$  است که در فشار بحرانی برابر با  $0.528$  می‌باشد. جریان هوا به صورت فرضی آرام در نظر گرفته می‌شود، پس با توجه به مرجع [۱] می‌توان به رابطه (۴) را به صورت زیر بیان نمود [۱]:

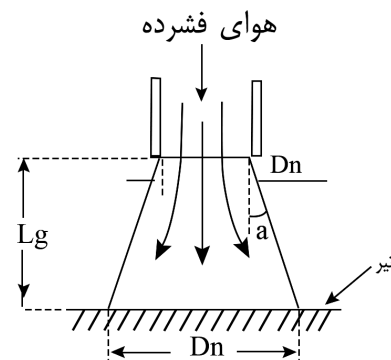
$$F = \frac{d(Vm)}{dt} = V\dot{m} + \dot{V}m \approx V\dot{m} \quad (4)$$

که در این معادله  $m$  مقدار جرمی است که از سر نازل خارج می‌شود و فرض بر این است که مقدار  $m$  کوچک بوده، در نتیجه  $\dot{V}m$  قابل حذف کردن است. در نتیجه برای به دست آوردن نیرو به رابطه (۵) می‌رسیم [۱]:

$$F = \frac{4\dot{m}^2}{(\pi \rho_0 D_s)^2} \quad (5)$$

با در نظر گرفتن شکل (۳) برای نازل استفاده از معادله (۶) میسر می‌شود:

$$D_s = D(1 + \sqrt{Lg} \cdot \tan(\alpha)) \quad (6)$$



شکل (۳) نمایی از نازل برای اندازه‌گیری نیروی ضربه هوا.

پارامترهای مؤثر بر نیروی به دست آمده فشار، چگالی و جریان جرمی از سر نازل است [۱].

یکی از گزینه‌ها برای انتخاب شیر، شیرهای سرو است که در زمان مناسب می‌تواند باز و بسته شود. پس می‌توان با استفاده از این شیر نیروی لازم را برای تحریک ایجاد کرد. متأسفانه این شیر تنها می‌تواند فرکانس‌های پائین را برای تحریک

جدول (۱) ضریب فرکانسی برای مودهای مختلف در تئوری اویلر-برنولی.

مود	$\lambda^2$
۱	۲۲/۴
۲	۶۱/۷
۳	۱۲۱
۴	۱۹۹

### ۷- آزمایش تجربی

برای انجام تست دستگاه طراحی شده، در این قسمت به معرفی تجهیزات مورد استفاده در این آزمایش می‌پردازیم. تجهیزاتی که در این آزمایش استفاده شده‌اند شامل یک شتاب‌سنج (B & K, Type 4366)، یک آمپلی‌فایر (B & K, Type 2635)، نالایزر (Symphonie 01db)، کارت دیتا اکویزیشن (PCI-1711-AE)، درایور (V 4.3)، و کمپرسور ۸۰ لیتری (هواسازان صبا) هستند. تیر مورد استفاده از جنس فولاد ۴۲۰ است. مشخصات مکانیکی آن در جدول شماره (۲) آورده شده است.

جدول (۲) خواص مکانیکی مواد.

نام فولاد	مدول الاستیسیته (Pa)	چگالی (kg/m)	ضریب پواسون
۴۲۰	۲۱۶	۷۷۰۰	۰/۳

ابعاد تیر استفاده شده در جدول (۳) که بر حسب میلی‌متر بیان شده قابل مشاهده است.

جدول (۳) ابعاد تیر آزمایش شده.

ضخامت mm	عرض mm	طول mm
۲	۲۰	۴۰۰

### ۸- نتایج به‌دست آمده

در این قسمت نتایج به‌دست آمده از تست‌های ضربه، بار ثابت و هارمونیک برای یافتن فرکانس‌های طبیعی تیر آورده شده و با جواب‌های تئوری مقایسه و بررسی شده است.

$V$  در رابطه بالا سرعت لغزنده می‌باشد، حداکثر سرعت دورانی موتور برابر است از رابطه (۱۰) به‌دست می‌آید:

$$n(rpm) = f_x \Theta_s \times \frac{60}{360} \quad (10)$$

$f_x$  فرکانس پالس‌های فرمان،  $\Theta_s$  زاویه پله می‌باشد. با در نظر گرفتن سرعت لغزنده و سرعت دورانی موتور می‌توان قطر پولی محرک را به صورت رابطه (۱۱) به‌دست آورد:

$$V = r\omega \quad (11)$$

در انتها تعداد دندانه‌های پولی را به‌دست می‌آوریم که ۳۲ عدد است [۳]. مقدار تقریبی طول گامی تسمه با داشتن رابطه (۱۲) برابر است با:

$$L_w = 2a + \frac{t}{2}(z_1 + z_2) + \frac{[t(z_1 - z_2)/\pi]^2}{4a} \quad (12)$$

$z_1$  و  $z_2$  تعداد دندانه‌های پولی‌ها،  $t$  گام دندانه تسمه است.

### ۶- مدل تیر دو سر گیردار

ارتعاشات عرضی تیر در تئوری کلاسیک با تئوری اویلر برنولی بصورت معادله (۱۳) مدل می‌شود.

$$-E \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (13)$$

در معادله فوق،  $A$  مساحت سطح مقطع،  $E$  مدول الاستیسیته و  $I$  ممان اینرسی مقطع  $\rho$  چگالی تیر است [۴-۵]. شرایط مرزی تیر دو سر گیردار مانند فرمول (۱۴) است:

$$\begin{aligned} y(0) = 0 & \quad \left. \frac{dy(x)}{dx} \right|_{x=0} = 0 \\ y(L) = 0 & \quad \left. \frac{dy(x)}{dx} \right|_{x=L} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

با قرار دادن شرط مرزی تیر دو سر گیردار فرکانس طبیعی تیر برای مودهای مختلف به صورت (۱۵) به‌دست می‌آید:

$$\omega = \lambda^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A I^4}} \quad (15)$$

از روابط بالا مقادیر ویژه به شکل جدول (۱) قابل مشاهده می‌باشد.

## ۹- نتیجه‌گیری

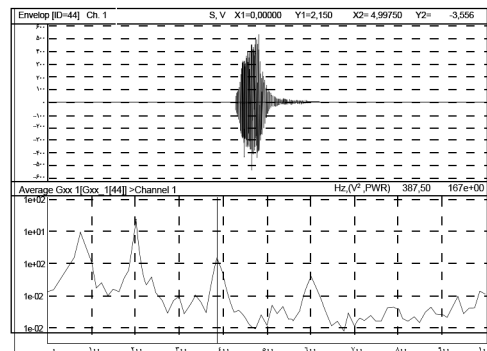
در این مقاله طراحی و ساخت دستگاه تحریک کننده متحرک بار متحرک و ثابت انجام شده است. این دستگاه توانایی تحریک تیر به وسیله ضربه، بار هارمونیک و بار ثابت ساکن و متحرک را دارد. با تحریک تیر می‌توان مشخصات دینامیکی آن را به دست آورد. با توجه به آنکه در جدول (۴) مورد بررسی قرار گرفته می‌توان بیان کرد تحریک بار متحرک در مقایسه با تحریک ضربه جواب‌های بهتری دارد. در کارهای تجربی گذشته، از اعمال نیروی تماسی (ضربه، هارمونیک، بار ثابت متحرک) و غیر تماسی برای به دست آوردن مشخصات دینامیکی استفاده شده است. در دستگاه طراحی شده تحریک تیر به صورت پنوماتیکی است. روش پنوماتیکی به علت پاکی و دقت از کارایی خوبی برخوردار است و برای تحلیل سازه‌های حساس و شکننده که روشهای دیگر مانند تحریک با چکش و الکترومغناطیس عملکرد مناسبی ندارند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فرکانس‌های طبیعی برای تیر دو سر گیردار با تحریک‌های متفاوت تولید شده توسط دستگاه، به دست آمده و نتایج مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد بار متحرک در مقایسه با بار ضربه دقت بالاتری دارد. نتایج این بخش در دو حالت کامل به صورت تئوری و تجربی در جدول (۴) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اختلاف اندک مشاهده شده می‌تواند به دلیل دقت نبودن خواص مواد استفاده شده، ابعاد تیر، شرایط مرزی، خطای ایجاد شده به دلیل وزن شتاب‌سنج و خطای انسانی باشد.

## مراجع

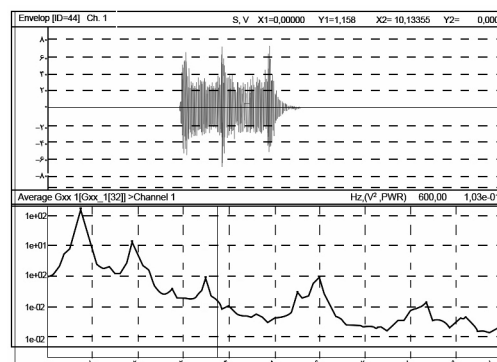
- [1] Farshidi R., Trieu D., Park S.S., Non-contact experimental modal analysis using air excitation and a microphone array, *Journal of Measurement*, Vol. 43, 2010, pp. 755–765.
- [2] Vanlanduit S., Daerden F., Guillaume P., Experimental modal testing using pressurized air excitation, *Journal of Sound and Vibration*, 2007, pp. 299 83–98 .
- [3] Hagedorn P., DasGupta A., *Vibrations and Waves in Continuous Mechanical Systems*, 2007.

جدول (۴) فرکانس طبیعی تیر با روش‌های مختلف.

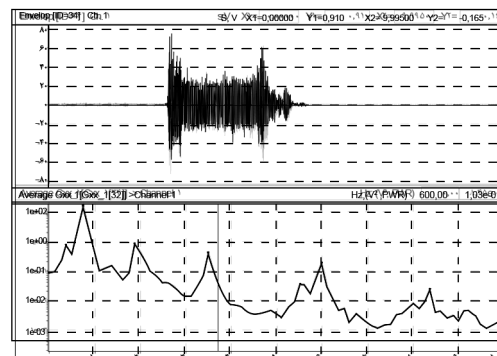
روش محاسبه	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم
تئوری با محاسبات ریاضی	۶۸/۱۶۹	۱۸۷/۷۷۰	۳۶۸/۲۳۶	۶۰۸/۳۵۰
تحریک هارمونیک	۷۵	۱۸۷/۵	۳۵۰	۶۰۰
تحریک ضربه	۷۵	۲۰۰	۳۸۷	۶۰۰
تحریک بار ثابت در حال حرکت	۷۵	۱۸۷/۵	۳۵۰	۶۰۰



شکل (۴) چهار فرکانس طبیعی تیر اوپلر با تحریک ضربه.



شکل (۵) چهار فرکانس طبیعی تیر اوپلر با تحریک هارمونیک.



شکل (۶) چهار فرکانس طبیعی تیر اوپلر با تحریک بار ثابت.

- [4] Stahle C.V., Phase separation technique for ground vibration testing Aerospace Engineering, 2000.
- [5] Fatemi M. , Greeneaf James, *Vibro-acoustography: An imaging modality based on ultrasound stimulated acoustic emission*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 96, 1999, pp. 6603–6608
- [6] Kennedy C.C., Panuc C.D.P., Use of vectors in vibration measurement and analysis, *Journal Aeronautical Science* ,Vol. 14, Issue.11,1997.
- [7] Shigley J.E., Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill,1989.
- [8] Kennedy C.C., Panuc C.D.P., Use of vectors in vibration measurement and analysis, *Journal Aeronautical Science* ,Vol. 14, Issue.11,1997.
- [9] Beards C. E., Structural Vibration: Analysis and Damping, John Wiley & Sons Inc,1996.