

# پایش لرزش‌های بسامد بزرگ در اتاق‌های آزمون موتور به کمک لرزه‌گیرهای بادی نیمه‌فعال با پایش گر PID

یوسف حجت \*

دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک - دانشگاه تربیت مدرس  
yhojjat@modares.ac.ir

محمد رضا قاسمی

کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - ساخت و تولید - دانشگاه تربیت مدرس  
mrgh\_63@yahoo.com

\* نویسنده مسئول/ تاریخ دریافت: ۸۹/۱۱/۵ پذیرش نهایی مقاله: ۹۰/۰۴/۱۱

## چکیده

امروزه لرزه‌گیرهای متنوعی در صنعت استفاده می‌شوند که هر نوع آنها برای محدوده جرمی مشخص دستگاه و بسامد تحریک معینی مناسب هستند. یکی از آنها فنرهای بادی هستند که در دو نوع بالشتکی و غشائی ساخته می‌شوند. نوع بالشتکی این لرزه‌گیرها برای پایش لرزش‌ها بسامد کوچک (بسامد کمتر از ۱۰ هرتز) و نوع غشائی در بسامد بزرگ (بسامد بزرگتر از ۲۰ هرتز) استفاده می‌شوند. بسامدهای بین ۱۰ تا ۲۰ هرتز، بسامد میانی محسوب و از انواع دیگر لرزه‌گیرها در آن محدوده استفاده می‌شود. در این مقاله طراحی و ساخت سامانه فنر بادی ای ارائه شده که با استفاده از جابه‌جائی سنج خطی، شتاب‌سنج‌ها و پایش گر PID، می‌توان از فنرهای بادی بالشتکی که برای بسامدهای کوچک استفاده می‌شوند، برای پایش لرزش‌های بسامد بزرگ (حدود ۵۰ هرتز) استفاده کرد. در نهایت لرزه‌گیر بهینه شده‌ای ساخته می‌شود که دامنه نوسانات را از ۲٫۷ میلی‌متر به ۰٫۱۵ میلی‌متر یعنی در حدود ۸۷٫۵٪ کاهش می‌دهد. تحلیل عنصر محدود نیز با نتایج تجربی مقایسه شده که با ۸٪ خطا تطابق خوبی را نشان می‌دهد. این پژوهش بنا به درخواست "شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو" برای پایش لرزش پایه‌های مورد استفاده در اتاق‌های آزمون موتور انجام شده است.

برخی از آنها در بسامدهای کوچک و برخی در بسامدهای بزرگ به کار می‌روند. برخی برای تجهیزات سبک و برخی برای تجهیزات سنگین مناسبند. ویژگی مشترک این لرزه‌گیرها، غیر فعال بودن آنها و محدودیت بسامدی است. لرزه‌گیرهای غیر فعال برای یک محدوده جرمی مشخص دستگاه و محدوده بسامدی معین، دارای کارکرد مناسبی هستند و در صورت تغییر جرم دستگاه قرار گرفته روی لرزه‌گیر یا تغییر بسامد، کارایی مناسبی نخواهند داشت و درصد لرزه‌گیری آن کاهش خواهد یافت. برای

کلید واژه‌ها: فنر بادی، لرزه‌گیر بادی، پایش نیمه‌فعال، پایش گر PID، پایش لرزش‌ها، بالشتک باد

## ۱- مقدمه

امروزه انواع متفاوتی از لرزه‌گیرها<sup>۱</sup> در صنعت به کار گرفته می‌شود. مرسوم‌ترین این لرزه‌گیرها عبارتند از: لرزه‌گیرهای لاستیکی، فنر لول، چوب پنبه‌ای و ... که هر کدام از این لرزه‌گیرها کاربردهای خاصی دارند.

۲- Passive

۱- Vibration Isolator

موضوع پژوهش	سال	محقق (محققان)
یافتن سفتی بر اساس نسبت حجمها، نسبت بسامدی و ضریب لوله موئین (در دو بخش) [۷]	۱۹۸۳	Rivin & IBachrach
ارائه رویکرد جدید در بهینه سازی فنربادی با یک شیر روشن/خاموش الکترومغناطیسی [۸]	۱۹۹۹	Toyofuku
بررسی اثرات فشار بر مساحت موثر، حجم و سفتی فنر بادی [۹]	۲۰۰۰	Sorli & Quaglia
ارائه الگو غیر خطی ریاضی و بررسی اثرات مقاومت گلویی [۱۰]	۲۰۰۱	Sorli & Quaglia
الگوسازی سفتی فنر بادی دو بالشتکه [۱۱]	۲۰۰۶	Hoon Lee & Joon Kim
استفاده از یک شیر فرمان یار <sup>۶</sup> بادی [۱۲]	۲۰۰۷	Kato et al
بهینه سازی قابلیت فنرهای بادی دو بالشتکه [۱۳]	۲۰۰۹	Hoon Lee & Joon Kim

از جدول ۱ مشاهده می شود، پژوهش انجام شده اولین پژوهشی است که روی بالشتکهای بادی به کمک پایش گر PID صورت گرفته است.

## ۲- شرح مسأله

به منظور پایش لرزشها، فنرهای بادی در دو نوع بالشتکی<sup>۷</sup> و غشائی<sup>۸</sup> استفاده می شوند. فنرهای بادی بالشتکی در بسامدهای کوچک<sup>۹</sup> و به صورت غیر فعال به کار می روند اما فنرهای بادی غشائی به صورت نیمه فعال و برای بسامدهای بزرگ به کار می روند. شکل ۲، انواع فنرهای بادی بالشتکی و شکل ۳، فنر بادی غشائی را نمایش می دهد.

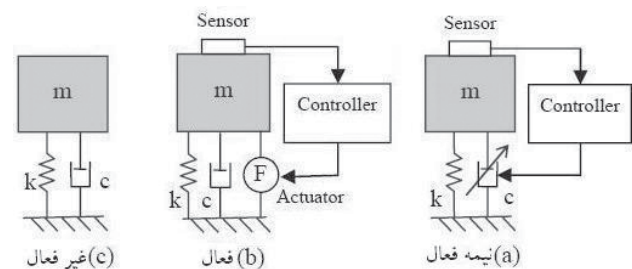


شکل ۲ انواع فنرهای بادی بالشتکی [۱۴]

کارکرد مناسب در شرایط متفاوت جرم و بسامد، لرزه گیرها باید بتوانند با تغییر آنی<sup>۱</sup> سفتی و میرایی خود، درصد جداسازی لرزش<sup>۲</sup> را به بیشترین مقدار ممکن برسانند. به همین دلیل لرزه گیرهایی با پایش کننده فعال<sup>۳</sup> و نیمه فعال<sup>۴</sup> ساخته شدند.

پیچیدگی و هزینه تولید این لرزه گیرها بسیار بیشتر از لرزه گیرهای غیر فعال است. لرزه گیرهای نیمه فعال، ویژگی هایی مابین لرزه گیرهای فعال و غیر فعال دارند و هزینه تولید و پیچیدگی آن نیز کمتر از هزینه تولید و پیچیدگی لرزه گیرهای فعال است.

در لرزه گیرهای نیمه فعال، پایش گر به صورت آنی، سفتی و میرایی لرزه گیر را تغییر می دهد اما در لرزه گیرهای فعال، پایش گر به کمک یک عملگر، درصد جداسازی لرزش را به بیشینه خود می رساند. شکل ۱ انواع پایش گره های لرزه گیرها را نشان می دهد.



شکل ۱ انواع پایش گره های لرزه گیرها [۱]

حال باید مروری بر پژوهش های صورت گرفته در زمینه فنرهای بادی از سال ۱۹۶۱ تا سال ۲۰۰۹ داشت. این پژوهش ها بطور خلاصه در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ مروری بر پژوهش های صورت گرفته

موضوع پژوهش	سال	محقق (محققان)
نمایش قابلیت جابه جایی لرزه گیرهای بادی [۲]	۱۹۶۱	Cavanaugh
استفاده از دو فنر برای جابه جایی <sup>۵</sup> سفتی ها [۳]	۱۹۶۳	Waller & Benham
استفاده از حجم کمکی برای غلبه بر ناپیوستگی نتایج در جابه جایی سفتی ها [۴]	۱۹۶۶	سلیمان و تاجر اردبیلی
استفاده از یک بلوک و استوانه بادی برای ایجاد رفتار دوگانه در بسامد بزرگ و کوچک [۵]	۱۹۶۸	Waller & Clough
استفاده از یک جدا کننده بادی با یک فنر خطی به صورت موازی [۶]	۱۹۸۲	Hundal

- ۱- Online
- ۲- Vibration Isolation
- ۳- Active
- ۴- Semi Active
- ۵- Switching

۶- Servo Valve

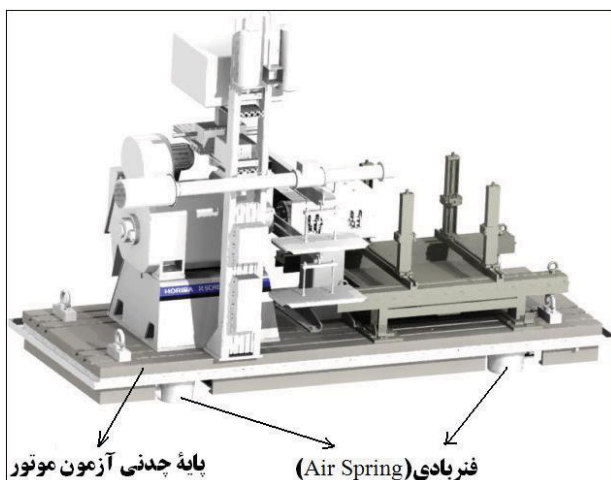
۷- Convolution Air Spring

۸- Membrane Air Spring

۹- در محدوده لرزه گیرها، بسامدهای تا بسامد ۱۰ هرتز، بسامد کوچک، از ۱۰ تا ۲۰ هرتز، بسامد میانی و از ۲۰ هرتز بیشتر، بسامد بزرگ محسوب می شود [۱۶]

همراه با یک پایش‌گر، یک حسگر مانند حسگر جابه‌جائی سنج خطی<sup>۵</sup>، تغییر ارتفاع را به صورت یک علامت برقی به مدار پایش‌گر ارسال می‌کند و مدار به شیر بادی فرمان جابه‌جائی غلتک شیر را می‌دهد. در پژوهش انجام شده، یک جابه‌جائی سنج خطی، تغییر ارتفاع را حس می‌کند و به یک مدار پایشی PID علامت می‌فرستد. این مدار با توجه به ضرایب P، I و D که کاربر تنظیم می‌کند، علامتی را به سر غلتک شیر تناسبی<sup>۶</sup> بادی به نحوی ارسال می‌کند که دامنه لرزش جرم مرتعش روی فنر بادی کمینه شود. یافتن ضرایب بهینه<sup>۱</sup> P، I و D از نتایج این پژوهش است. نوآوری در این پژوهش این است که با این مدار پایشی PID و ضرایب بهینه‌ای که از آزمون‌ها به دست می‌آید می‌توان فنرهای بادی بالشتکی را که هم اکنون در پایش لرزش بسامدهای کوچک استفاده می‌شود، در بسامدهای بزرگ به کار برد.

شایان ذکر است از فنرهای بادی با پایش‌گر نیمه‌فعال به وفور در اتاق‌های اندازه‌گیری دقیق، اتاق‌های آزمون موتور و موارد مشابه استفاده می‌شود. معمولاً<sup>۴</sup>، ۶ و ۸ فنر بادی زیر پایه فلزی آزمون موتور مورد استفاده قرار می‌گیرد که شکل ۵ نمونه‌ای از کاربرد فنر بادی در اتاق آزمون موتور و محل قرارگیری آن را نشان می‌دهد.

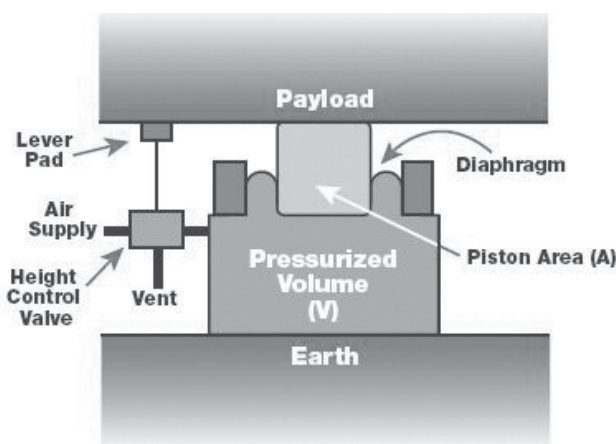


شکل ۵ کاربرد فنرهای بادی در اتاق آزمون موتور [۱۸]



شکل ۳ فنر بادی غشائی [۱۵]

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که در قسمت پایش سامانه یک فنر بادی با پایش نیمه‌فعال، یک شیر پایش ارتفاع<sup>۱</sup> وجود دارد که در صورت پائین آمدن جرم بار<sup>۲</sup>، باز می‌شود و با ورود باد به داخل بالشتک، جرم بار به سطح مینا<sup>۳</sup> باز می‌گردد و در صورت افزایش جرم بار، شیر پایش ارتفاع با خالی کردن باد بالشتک به جو<sup>۴</sup>، جرم بار را به سطح مینا باز می‌گرداند. با نوسان جرم بار (جرم مرتعش)، این اعمال مدام تکرار و بدین ترتیب دامنه لرزش جرم بار کمینه می‌شود.



شکل ۴ نحوه کار فنرهای بادی نیمه‌فعال [۱۷]

در سامانه مذکور، شیر پایش ارتفاع به صورت مکانیکی تغییر ارتفاع را حس می‌کند و نیز به صورت مکانیکی غلتک شیر<sup>۴</sup> را جابه‌جا می‌کند و در نتیجه باعث تغییر آنی سفتی و میرایی می‌شود، از این رو پایش این سامانه‌ها به صورت نیمه‌فعال است. اما در سامانه‌ای با پایش نیمه‌فعال

### ۳- معادلات

سه متغیر اساسی یک لرزه‌گیر، سفتی، میرایی و بسامد طبیعی آن است. در لرزه‌گیر با پایش نیمه‌فعال، پایش‌گر با تغییر آنی سفتی و میرایی، دامنه لرزش جسم مرتعش را کمینه می‌کند. از طرفی هر چه بسامد طبیعی لرزه‌گیر کوچک‌تر باشد، نسبت بسامد تحریک به بسامد طبیعی بیشتر

<sup>۵</sup>- LVDT

<sup>۶</sup>- Proportional Control Valve

<sup>۱</sup>- Height Control Valve

<sup>۲</sup>- Payload

<sup>۳</sup>- Set Point

<sup>۴</sup>- Valve Spool

سفتی فنر از نسبت تغییرات نیرو به تغییرات ارتفاع به دست می آید. در فنرهای بادی این معادله به صورت تفاضلی مطرح می شود. در واقع تفاضل نیرو به ارتفاع برابر سفتی فنر است که با مشتق گیری از معادله (۱) نسبت به ارتفاع به دست می آید. معادله (۲) سفتی فنر بادی را نشان می دهد [۱۹].

$$K_A = \frac{dF_t}{dh} \rightarrow K_A = \frac{dP}{dh} A_p + P \frac{dA_p}{dh} - \frac{dF_y}{dh} \quad (2)$$

اطلاعات مورد نیاز عوامل ذکر شده در معادلات، از دفترک مشخصات بالشتک های بادی شرکت های سازنده قابل دست یابی است. برای بررسی جزئیات بیشتر به مرجع [۱۹] مراجعه نمایید.

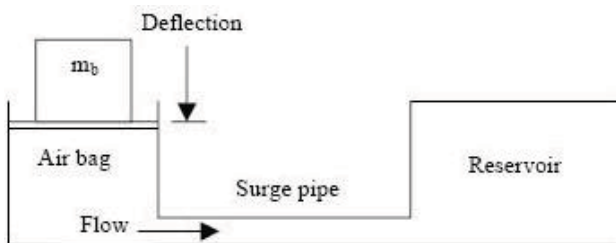
### ۳-۲- میرایی<sup>۲</sup> فنرهای بادی

افت فشار کلی در لوله واسطه<sup>۳</sup> که در شکل ۷ نشان داده شده است به علت تلف شدن انرژی در سیال بر اثر این عوامل حاصل می شود [۲۰]:

(۱) اصطکاک سیال با لوله

(۲) تغییر جهت جریان

(۳) آشفته گی جریان سیال به علت تغییر ناگهانی سطح مقطع (انقباض و انبساط سیال باعث اتلاف انرژی می شود).



شکل ۷ طرحواره سامانه تعلیق بادی [۲۰]

ضریب اتلاف کلی از معادله (۳) به دست می آید [۲۰] که در آن  $K_{fr}$ ,  $K_c$ ,  $K_{en}$  و  $K_b$  به ترتیب، ضریب اتلاف ناشی از اصطکاک، ضریب اتلاف ناشی از انبساط سیال به علت تغییر سطح مقطع لوله، ضریب اتلاف ناشی از انقباض سیال به علت تغییر سطح مقطع لوله و ضریب اتلاف ناشی از خمش لوله یا زانویی است که برای محاسبه این ضرایب می توانید به مرجع [۲۰] مراجعه نمایید.

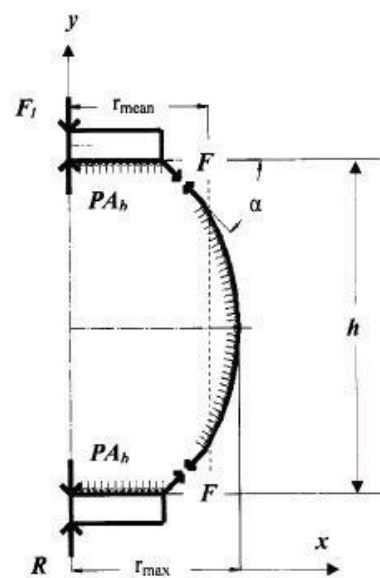
$$K_t = K_{fr} + K_{en} + K_c + K_b \quad (3)$$

<sup>۲</sup>- Damping  
<sup>۳</sup>- Surge Pipe

می شود و جداسازی لرزش افزایش می یابد. کوچک بودن بسامد طبیعی فنرهای بادی (کمتر از ۴ هرتز)، از مزایای عمده این لرزه گیرها به شمار می رود. در ادامه اشاره ای به معادلات این سه متغیر شده است.

### ۳-۱- سفتی<sup>۱</sup> فنرهای بادی

سفتی فنر بادی را می توان نیروی لازم برای فشردگی یا بازشدگی واحد طول ارتفاع فنر بادی تعریف نمود. بنابراین ابتدا لازم است نیروهای موجود در فنر بادی شناسائی شود. در شکل ۶ این نیروها نمایش داده شده است.



شکل ۶ نیروهای موجود در فنرهای بادی بالشتکی [۱۹]

در این شکل،  $F_t$ ,  $F_y$ ,  $F$ ,  $A_p$ ,  $r_{mean}$ ،  $F_0$  و  $h$  به ترتیب نیروی حاصل از فنر بادی، تصویر سطح مؤثر در صفحه  $\alpha$ ، برآیند نیروی وارده از الاستومر بالشتک بادی، نیرویی که بالشتک در فشار صفر اعمال می کند (از دفترک فنر بادی قابل محاسبه است)، شعاع متوسط (برابر شعاع استوانه معادل فنر بادی است)، زاویه ابتدای الاستومر بالشتک نسبت به افق، ارتفاع بالشتک و فشار باد بالشتک است. نیروی بالشتک برآیند نیروهای حاصل از فشار باد، عکس العمل الاستومر بالشتک و نیروی پیش بار است که در معادله (۱) آمده است [۱۹].

$$F_t = PA_p - F_y + F_0 \quad (1)$$

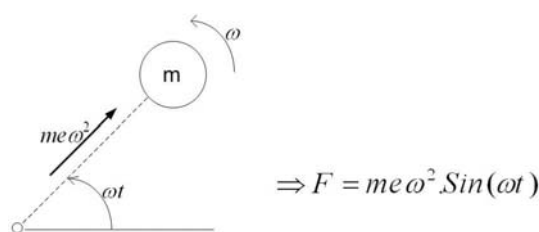
$$F_y = (p r_{mean} h) P \tan(\alpha)$$

<sup>۱</sup>- Stiffness

- (۲) واحد پایش<sup>۶</sup> آزمون‌های حالت ایستا(پایش غیر فعال)  
 (۳) واحد پایش آزمون‌های حالت پویا(پایش نیمه‌فعال)

#### ۴-۱- چیدمان مکانیکی

می‌دانیم که در صورت دوران جرم خروج از مرکز، نیروی سینوسی از طرف جرم به سازه منتقل می‌شود. شکل ۹ این نیرو را به صورت طرحواره نشان می‌دهد.



شکل ۹ نمایش طرحواره نیروی خروج از مرکز

در شکل ۹ عوامل  $F, m, e, \omega$  و  $t$  به ترتیب، نیروی گریز از مرکز، جرم نامیزان، میزان خروج از مرکزی(فاصله بین مرکز جرم و مرکز دوران شفت نا میزبان)، سرعت زاویه ای شفت نامیزان و زمان است. در بخش لرزاننده چیدمان ساخته شده برای انجام آزمون از دوران شفت خروج از مرکز برای تولید نیروی لرزشی سینوسی استفاده شده است. با توجه به اینکه صفحات بالائی و میانی به علت وجود میل راهنما فقط در راستای عمود بر زمین می‌توانند حرکت کنند، دوران شفت نامیزان، حرکت نوسانی سینوسی در راستای عمود بر زمین را برای صفحات بالائی و میانی ایجاد می‌نماید. چیدمان طراحی شده در شکل ۱۰ به همراه معرفی اجزای آن نشان داده شده است.

در مرکز صفحات بالائی و میانی، دو شتاب‌سنج تک جهت پیزو برای اندازه گیری شتاب نوسانات در راستای عمود نصب شده است. جابه‌جائی سنج خطی به منظور اندازه گیری فاصله نسبی صفحات بالائی و میانی نصب شده است. دور موتور برقی توسط یک مبدل قابل تغییر است تا بدین وسیله بتوان بسامد نوسانات لرزاننده را برای آزمایش مختلف تغییر داد. چیدمان ساخته شده برای آزمایش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشخص است که با گردش موتور برقی و چرخش محور نامیزان، به علت ایجاد نیروی نوسانی مرتعش، صفحه بالائی در راستای عمود نوسان خواهد کرد. شیر بادی با پایش شار ورودی به بالشتک در هنگام پائین آمدن صفحه بالائی و شار خروجی به هنگام بالا رفتن صفحه بالائی، دامنه نوسانات این صفحه را کاهش خواهد داد. بالشتک بین صفحات بالائی و میانی قرار دارد و از زیر صفحه میانی تغذیه می‌شود.

۶- Control Unit

#### ۳-۳- بسامد طبیعی<sup>۱</sup> فنرهای بادی

می‌دانیم که در لرزش آزاد سامانه جرم و فنر بدون میرایی، سامانه با بسامد طبیعی خود نوسان خواهد کرد. با فرض تغییرات ناچیز مساحت بسامد طبیعی نامیرا در لرزش عمودی برای فنر بادی به صورت معادله<sup>(۴)</sup> خواهد بود [۲۰].

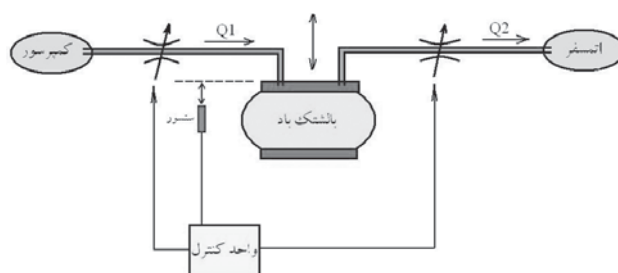
$$f_n = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{K_{z, dyn}}{m}} = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{g \cdot (p_a + p_g) \cdot \frac{A_e^2}{V}}{m}} = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{g \cdot (p_a + p_g) \cdot A_e^2}{V \cdot m}} = \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2p} \sqrt{g \cdot g \cdot \left(\frac{p_a}{p_g} + 1\right) \cdot \frac{A_e^2 \cdot p_g}{V \cdot m \cdot g}} = \frac{1}{2p} \sqrt{g \cdot g \cdot \left(\frac{p_a}{p_g} + 1\right) \cdot \frac{A_e^2}{V}}$$

که در آن  $\gamma, g, P_a, P_g, A_e, V$  به ترتیب، نسبت  $C_p/C_v$  (برای هوا برابر ۱٫۴ است)، شتاب گرانشی زمین، فشار هوای اتمسفر، فشار هوای نشان داده شده در شاخص فشار<sup>۲</sup> متصل به بالشتک، مساحت مؤثر<sup>۳</sup> (از تقسیم نیروی بالشتک در فشار  $P$  به فشار  $P$  به دست می‌آید) و حجم بالشتک است.

#### ۴- طراحی و ساخت مجموعه آزمایش

طرح کلی مجموعه آزمایش<sup>۴</sup> بدین صورت است که با نوسان صفحه بالائی بالشتک، حسگر جابه‌جائی سنج تغییر مکان این صفحه را حس می‌کند و علامتی به پایش‌گر ارسال می‌کند و پایش‌گر بر اساس ضرایب وارد شده کاربر، مقدار شار باد ورودی و خروجی بالشتک را با علامت‌رسانی به شیر بادی به نحوی پایش می‌کند که دامنه نوسانات صفحه بالائی بالشتک کمینه گردد. طرحواره طرح کلی مجموعه آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸ نمایش طرحواره طرح کلی مجموعه آزمایش

مجموعه طراحی و ساخته شده برای آزمایش را می‌توان به سه بخش اصلی تقسیم بندی نمود:

#### (۱) چیدمان<sup>۵</sup> مکانیکی

۱- Natural Frequency

۲- Pressure Gauge

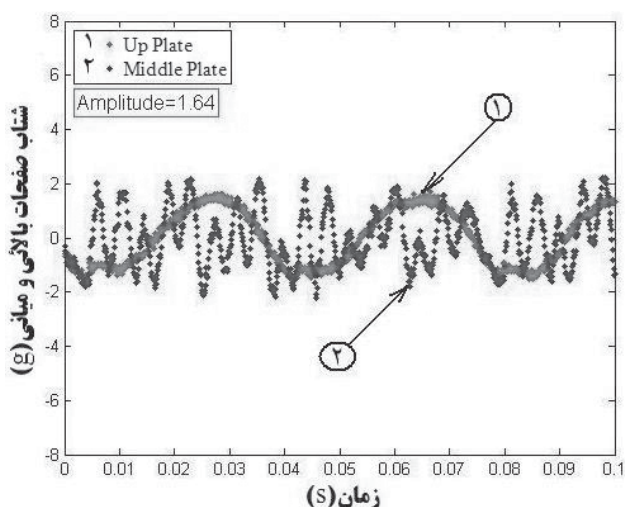
۳- Effective Area

۴- Experiment Setup

۵- Setup



بالائی به عنوان نمونه در شکل ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۳ نمودار شتاب صفحات بالائی و پائینی حاصل از شتاب‌سنج‌ها

نمودار شماره ۱ در شکل ۱۳ متعلق به شتاب صفحه بالائی و نمودار شماره ۲ متعلق به شتاب صفحه میانی است.

برای به‌دست آوردن درصد نسبت شتاب، باید بیشینه شتاب نظری صفحه بالائی را در هر بسامد برای هر دو جرم ۱۷۰ و ۲۱۰ کیلوپی به‌دست آورد. منظور از شتاب نظری، شتاب صفحه بالائی در اثر نیروی نوسانی و بدون وجود بالشتک است. با استفاده از قانون دوم نیوتن این مقادیر در هر بسامد به‌دست آمده است. این مقادیر در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲ فهرست آزمون‌های حالت ایستایی

شماره آزمایش	بسامد نوسان (هرتز)	فشار باد بالشتک (بار)
۱	۲	۲۵
۲	۲	۳۰
۳	۲	۳۵
۴	۲	۴۰
۵	۲	۴۵
۶	۲	۵۰
۷	۲/۵	۲۵
۸	۲/۵	۳۰
۹	۲/۵	۳۵
۱۰	۲/۵	۴۰
۱۱	۲/۵	۴۵

می‌شود. پنجره‌هایی از این نرم افزار بیشترین فاصله و کمترین فاصله ابزار جابه‌جائی سنج خطی نسبت به پائین‌ترین نقطه ممکن ابزار (نقطه صفر) و مقدار دامنه نوسانات صفحه بالائی بر حسب میلی‌متر به صورت لحظه به لحظه نمایش داده می‌شود. در پنجره دیگر، موقعیت نقطه مینا<sup>۱</sup> بر حسب میلی‌متر و میزان نیروی برقی لحظه‌ای خروجی (نیروی برقی شیر بادی) نمایش داده می‌شود. در یکی دیگر از پنجره‌ها می‌توان نیروی برقی اولیه شیر را به صورت دستی تنظیم کرد. این عمل برای تنظیم ارتفاع اولیه که تنظیم فشار را به دنبال دارد انجام می‌شود. در آخرین پنجره، موقعیت نقطه مینا، نیروی برقی ورودی (نیروی برقی دریافتی از شیر) و نیروی برقی خروجی (نیروی برقی شیر که با توجه به مقادیر  $I$  و  $P$  و نیروی برقی ورودی تنظیم می‌شود) نمایش داده می‌شود. هدف این است که میزان دامنه نوسانات حداقل گردد. تفاوت بین حالت‌های ایستا و پویا در پایش‌گر آنهاست. در واقع حالت پویا علاوه بر همان چیدمان مکانیکی حالت ایستا، شامل حسگر جابه‌جائی سنج، مدار پایش‌گر PID و شیر تناسی بادی است.

## ۵- نتایج آزمون‌های حالت ایستا و پویا

ابتدا آزمون‌های حالت ایستا و سپس حالت پویا انجام می‌شود. هدف از آزمون‌های حالت ایستا، به‌دست آوردن فشار بهینه برای آزمون‌های حالت پویاست. در نهایت آزمون‌هایی انجام می‌شود که در آنها میزان دامنه لرزش صفحه بالائی در فشار بهینه و بسامدهای مشابه، هم در حالت ایستا و هم در حالت پویا با هم مقایسه می‌شوند تا میزان اثر پایش‌گر PID در کاهش دامنه لرزش صفحه بالائی به‌دست آید.

### ۵-۱- آزمون‌های حالت ایستا

با توجه به اینکه بالشتک باد انتخاب شده در دو فشار ۳ و ۳/۵ بار به ترتیب ۱/۷ و ۲/۱ کیلو نیوتن نیرو می‌دهد [۲۲]، ۳۰ آزمایش حالت ایستایی در دو حالت انجام شد. در حالت اول، جرم صفحه بالائی بالشتک، ۱۷۰ کیلوگرم و در حالت دوم، ۲۱۰ کیلوگرم بود. بنابراین فشارهای ۳ و ۳/۵ بار را فشارهای ایستایی می‌نامیم که با  $P_{st}$  نشان می‌دهیم. بنابراین ۶۰ آزمایش در دو حالت ۳۰ آزمایشی، برای دو جرم ۱۷۰ و ۲۱۰ کیلوگرم صفحه بالائی بالشتک انجام شد. در هر ۶۰ آزمایش بیشینه شتاب صفحه بالائی ثبت شد. فهرست آزمون‌های حالت ایستا در هر حالت در جدول ۲ آمده است. اطلاعات برداشت شده از شتاب‌سنج‌ها در آزمایشی با فشار ۲/۵ بار، بسامد ۳۰ هرتز و جرم ۱۷۰ کیلوپی صفحه

۱- Set Point

ادامه جدول ۲ فهرست آزمون‌های حالت ایستایی

بسامد نوسان (هرتز)	فشار باد بالشتک (بار)	شماره آزمایش
۵۰	۲/۵	۱۲
۲۵	۳	۱۳
۳۰	۳	۱۴
۳۵	۳	۱۵
۴۰	۳	۱۶
۴۵	۳	۱۷
۵۰	۳	۱۸
۲۵	۳/۵	۱۹
۳۰	۳/۵	۲۰
۳۵	۳/۵	۲۱
۴۰	۳/۵	۲۲
۴۵	۳/۵	۲۳
۵۰	۳/۵	۲۴
۲۵	۴	۲۵
۳۰	۴	۲۶
۳۵	۴	۲۷
۴۰	۴	۲۸
۴۵	۴	۲۹
۵۰	۴	۳۰

جدول ۳ مقادیر شتاب نظری صفحه بالائی در سطوح بسامد آزمایش

بسامد (Hz)	بیشینه شتاب (g)
۲۵	۴/۵۶
۳۰	۶/۵۷
۳۵	۸/۹۴
۴۰	۱۱/۶۸
۴۵	۱۴/۷۸
۵۰	۱۸/۲۵

حال باید مقادیر ثبت شده شتاب بیشینه صفحه بالائی را بر مقادیر نظری شتاب در هر بسامد تقسیم کرد تا درصد نسبت شتاب به دست آید. این مقادیر برای ۳۰ آزمایش اول (جرم ۱۷۰ کیلوگرمی صفحه بالائی) در جدول ۴ آورده شده است.

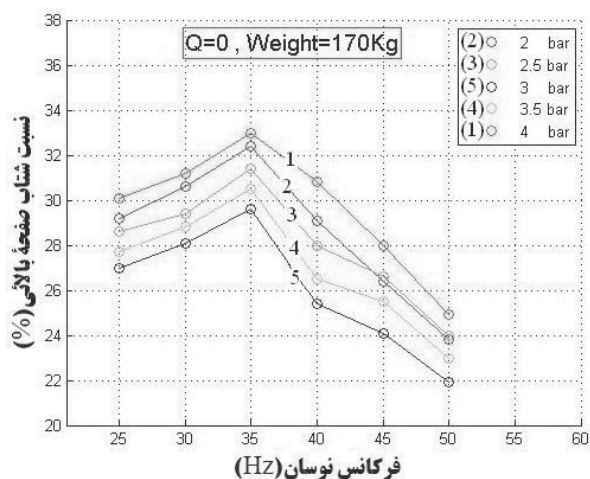
جدول ۴ مقادیر درصد نسبت شتاب در حالت اول آزمون‌های حالت ایستایی

درصد نسبت شتاب	بیشینه شتاب نظری (g)	بیشینه شتاب تجربی (g)	بسامد نوسان (Hz)	فشار باد بالشتک (bar)	شماره آزمایش
۲۹/۲	۴/۵۶	۱/۳۳	۲۵	۲	۱
۳۰/۶	۶/۵۷	۲/۰۱	۳۰	۲	۲
۳۲/۴	۸/۹۴	۲/۸۹	۳۵	۲	۳
۲۹/۱	۱۱/۶۸	۳/۳۹	۴۰	۲	۴
۲۶/۴	۱۴/۷۸	۳/۹۰	۴۵	۲	۵
۲۳/۸	۱۸/۲۵	۴/۳۴	۵۰	۲	۶
۲۸/۶	۴/۵۶	۱/۳۰	۲۵	۲/۵	۷
۲۹/۴	۶/۵۷	۱/۹۳	۳۰	۲/۵	۸
۳۱/۴	۸/۹۴	۲/۸۱	۳۵	۲/۵	۹
۲۷/۹۵	۱۱/۶۸	۳/۲۶	۴۰	۲/۵	۱۰
۲۶/۶	۱۴/۷۸	۳/۹۳	۴۵	۲/۵	۱۱
۲۴	۱۸/۲۵	۴/۳۸	۵۰	۲/۵	۱۲
۲۷	۴/۵۶	۱/۲۳	۲۵	۳	۱۳
۲۸/۱	۶/۵۷	۱/۸۵	۳۰	۳	۱۴
۲۹/۶	۸/۹۴	۲/۶۵	۳۵	۳	۱۵
۲۵/۴	۱۱/۶۸	۲/۹۷	۴۰	۳	۱۶
۲۴/۱	۱۴/۷۸	۳/۵۶	۴۵	۳	۱۷
۲۱/۹	۱۸/۲۵	۳/۹۹	۵۰	۳	۱۸
۲۷/۷	۴/۵۶	۱/۲۶	۲۵	۳/۵	۱۹
۲۸/۸	۶/۵۷	۱/۸۹	۳۰	۳/۵	۲۰
۳۰/۵	۸/۹۴	۲/۷۳	۳۵	۳/۵	۲۱
۲۶/۵	۱۱/۶۸	۳/۰۹	۴۰	۳/۵	۲۲
۲۵/۵	۱۴/۷۸	۳/۷۷	۴۵	۳/۵	۲۳
۲۳	۱۸/۲۵	۴/۲۰	۵۰	۳/۵	۲۴
۳۰/۱	۴/۵۶	۱/۳۷	۲۵	۴	۲۵
۳۱/۲	۶/۵۷	۲/۰۵	۳۰	۴	۲۶
۳۳	۸/۹۴	۲/۹۵	۳۵	۴	۲۷
۳۰/۸	۱۱/۶۸	۳/۶۰	۴۰	۴	۲۸
۲۸	۱۴/۷۸	۴/۱۳	۴۵	۴	۲۹
۲۴/۹	۱۸/۲۵	۴/۵۴	۵۰	۴	۳۰

جدولی مشابه جدول ۴ برای آزمون‌هایی که با جرم ۲۱۰ کیلوگرمی صفحه بالائی انجام شده نیز ثبت گردید. فشار بهینه فشاری است که

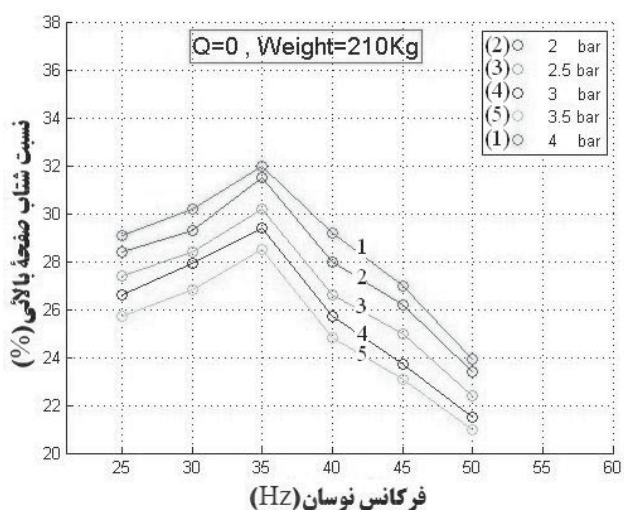
نمودارهای شکل ۱۴ و ۱۵ نشان می‌دهد که، در هر دو مجموعه آزمون‌ها (جرم ۱۷۰ و جرم ۲۱۰ کیلوگرمی صفحه بالائی)، نسبت شتاب در نسبت فشار ۱ کمینه بوده و می‌توان گفت درصد کاهش شتاب در این نسبت فشار بیشینه است. نتیجه این بخش از آزمون‌ها این است که در فشاری که بالشتک در آن فشار، نیرویی معادل نیروی حاصل از جرم قرار گرفته بر روی بالشتک می‌دهد، مقادیر سفتی و میرایی مقادیری هستند که بهترین جداسازی لرزش در آن رخ می‌دهد.

به منظور بررسی اثر تغییرات بسامد بر رفتار بالشتک، نمودارهای شکل ۱۴ و ۱۵ به صورت درصد نسبت شتاب بر حسب بسامد تحریک ترسیم شده است که برای جرم ۱۷۰ و ۲۱۰ کیلوگرمی صفحه بالائی به ترتیب در نمودارهای شکل ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است.



فرکانس نوسان (Hz)

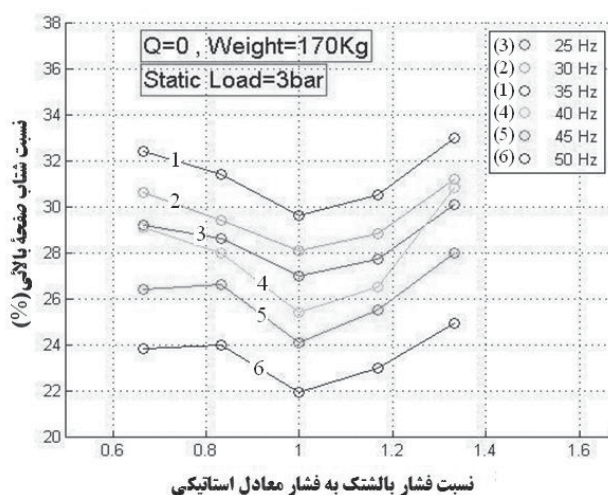
شکل ۱۶ نمودار معرف درصد کاهش شتاب صفحه بالائی بر حسب بسامد نوسان با جرم ۱۷۰ کیلوگرمی صفحه بالائی



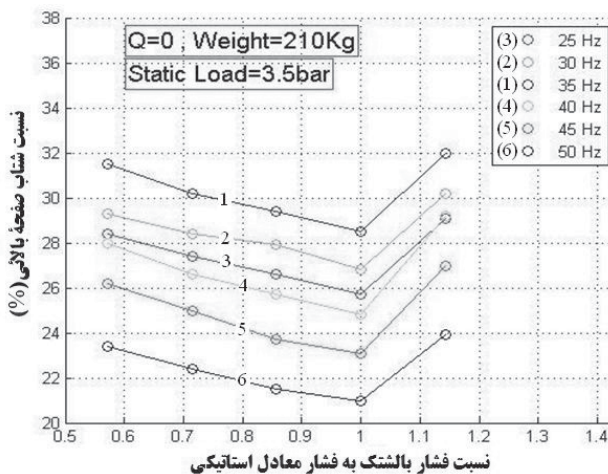
فرکانس نوسان (Hz)

شکل ۱۷ نمودار معرف درصد کاهش شتاب صفحه بالائی بر حسب بسامد نوسان با جرم ۲۱۰ کیلوگرمی صفحه بالائی

در آن، درصد نسبت شتاب، کمینه باشد. در واقع هرچه درصد نسبت شتاب کمتر باشد، درصد کاهش شتاب بیشینه است. به عنوان مثال اگر درصد نسبت شتاب ۳۰٪ باشد، بدین معنا است که بالشتک در آن شرایط بسامدی و فشار باد، شتاب صفحه بالائی را به ۳۰٪ مقداری رسانده که بالشتک وجود ندارد، بنابراین درصد کاهش شتاب ۷۰٪ است. نمودار درصد نسبت شتاب صفحه بالائی بر حسب نسبت فشار (نسبت فشار باد در هر آزمایش به فشار ایستایی) در بسامدهای مختلف برای دو حالت جرم ۱۷۰ کیلوگرمی و ۲۱۰ کیلوگرمی صفحه بالائی به ترتیب در نمودارهای شکل ۱۴ و ۱۵ ترسیم شده است.



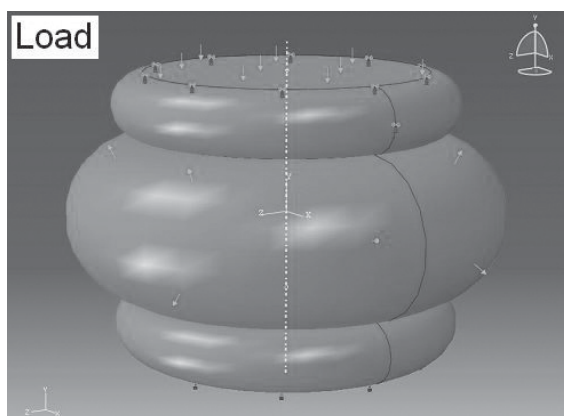
شکل ۱۴ نمودار معرف درصد کاهش شتاب صفحه بالائی بر حسب نسبت فشار با جرم ۱۷۰ کیلوگرمی صفحه بالائی



شکل ۱۵ نمودار معرف درصد کاهش شتاب صفحه بالائی بر حسب نسبت فشار با جرم ۲۱۰ کیلوگرمی صفحه بالائی

فهرهای بادی دارد در نرم افزار آباکوس شبیه‌سازی شد و فشار باد ۳ بار، به روش کدنویسی در این نرم افزار تعریف شد. مواد ابر ارتجاعی با دو ضریب در نرم افزار آباکوس تعریف می‌شوند. این دو ضریب برای فنر بادی  $C_{11}=3/2 \text{ MPa}$  و  $C_{12}=0/8 \text{ MPa}$  است. [۲۳] این ضرایب در مثال حل شده در راهنمای نرم افزار آباکوس است که به دلیل تشابه تحلیل فنر بادی تک بالشتکه در نرم افزار آباکوس و پژوهش صورت گرفته این ضرایب با تقریب خوبی یکسان فرض شده‌اند.

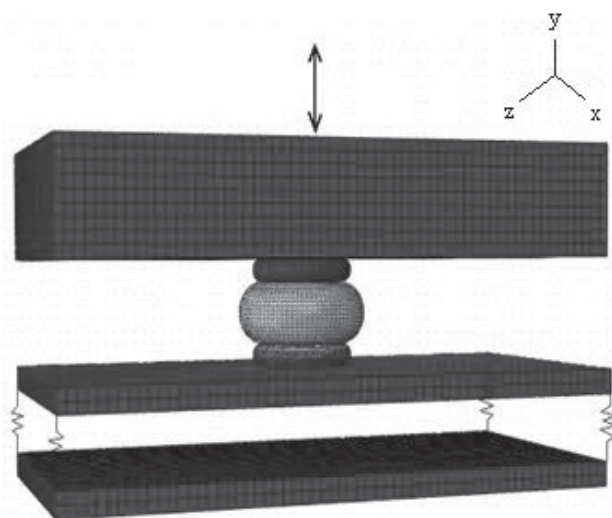
معادل جرم صفحه بالائی بر الگو، یک نیروی ثابت ۱/۷ کیلو نیوتن در بخش بارگذاری نرم افزار اعمال شد. در همین بخش نرم افزار به کمک بسط فوریه یک نیروی هارمونیک برابر با نیروی واقعی در هر ۶ بسامد ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ هرتز اعمال شد. دقیقاً مانند حالت ایستا تعداد ۳۰ تحلیل انجام شد. نتایج این تحلیل‌ها به صورت شتاب نوسانی صفحه بالائی برحسب زمان رسم گردید. الگوی شبکه‌بندی و بارگذاری شده فنر بادی در شکل ۱۹ نمایش داده شده است.



از نمودارهای شکل ۱۶ و ۱۷ مشاهده می‌شود که درصد کاهش شتاب در بسامد ۳۵ هرتز کمینه است. این نقطه معرف بسامد طبیعی مجموعه است. تحلیل حالات کل مجموعه در نرم افزار آباکوس، صحت این فرضیه را تأیید می‌کند.

## ۲-۵- تحلیل حالات مجموعه آزمایش

الگوی شبکه‌بندی شده چیدمان آزمایش در نرم افزار آباکوس در شکل ۱۸ به نمایش درآمده و نتایج آن در جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۸ الگوی شبکه‌بندی شده چیدمان آزمایش در نرم افزار آباکوس

جدول ۵ مقادیر بسامد طبیعی مود اول حاصل از تحلیل حالات

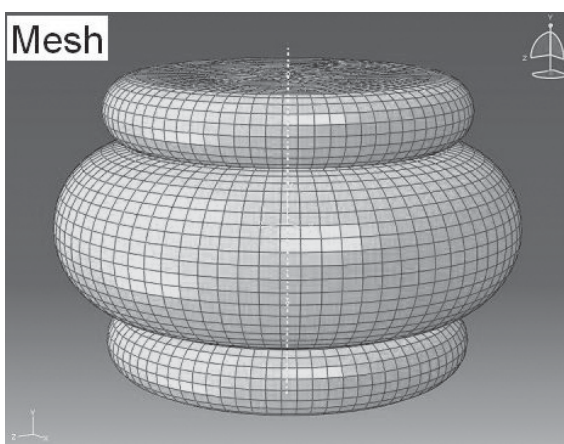
فشار باد بالشتک / جرم صفحه بالائی	۱۷۰ کیلوگرم	۲۱۰ کیلوگرم
۲ بار	۳۸/۲ هرتز	۳۱/۷ هرتز
۴ بار	۳۹/۴ هرتز	۳۲/۵ هرتز

از جدول ۵ مشخص است، می‌توان بسامد ۳۵ هرتز که در نمودارهای شکل ۱۶ و ۱۷ دارای بیشترین نسبت شتاب بود را بسامد طبیعی چیدمان آزمایش دانست.

## ۳-۵- تحلیل عنصر محدود آزمون‌های حالت ایستا و مقایسه آن با نتایج تجربی آزمون‌ها

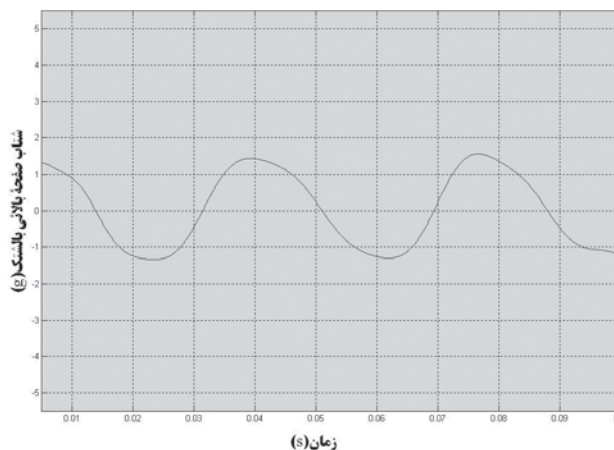
فنر بادی با ماده ابر ارتجاعی<sup>۲</sup> که رفتاری بسیار مشابه ماده ارتجاعی

۱- Abaqus Software  
۲- Hyper Elastic



شکل ۱۹ الگوی شبکه‌بندی شده بالشتک باد در نرم افزار آباکوس

به عنوان نمونه، نمودار شتاب مرکز سطح صفحه بالائی بالشتک بر حسب زمان در بسامد ۳۰ هرتز و فشار ۲/۵ بار باد بالشتک حاصل از تحلیل عنصر محدود در نرم افزار آباکوس در شکل ۲۰ آورده شده است.



شکل ۲۰ نمودار شتاب صفحه بالائی بالشتک در تحلیل عنصر محدود آزمون‌های حالت ایستایی در نرم افزار آباکوس

مقایسه بین مقادیر بیشینه شتاب صفحه بالائی بالشتک در دو حالت آزمون‌های تجربی و تحلیل عنصر محدود در حالت ایستا است.

جدول ۶ جدول مقایسه نتایج آزمون‌های حالت ایستایی و نتایج عنصر محدود

فشار باد بالشتک (bar)	بسامد نوسان (Hz)	در عنصر محدود (g)	بیشینه شتاب صفحه بالائی	در آزمون‌های تجربی (g)	بیشینه شتاب صفحه بالائی	تفاضلات و میانگین	مجدور تفاضل قدر مطلق
۲	۲۵	۱/۴۶	۱/۳۳	۱/۳۳	۰/۰۰۳۵۲	۰/۰۰۳۵۲	۲
۲	۲۰	۱/۹۲	۲/۰۱	۲/۰۱	۰/۰۰۹۸۷	۰/۰۰۹۸۷	۲
۲	۲۵	۲/۶۰	۲/۸۹	۲/۸۹	۰/۰۱۰۳۲	۰/۰۱۰۳۲	۲
۲	۴۰	۳/۱۰	۳/۳۹	۳/۳۹	۰/۰۱۰۱۳	۰/۰۱۰۱۳	۲
۲	۴۵	۳/۷۲	۳/۹۰	۳/۹۰	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۹	۲
۲	۵۰	۴/۵۱	۴/۳۴	۴/۳۴	۰/۰۰۰۳۷	۰/۰۰۰۳۷	۲
۲/۵	۲۵	۱/۵۶	۱/۳۰	۱/۳۰	۰/۰۰۴۹۹	۰/۰۰۴۹۹	۲/۵
۲/۵	۳۰	۱/۷۷	۱/۹۳	۱/۹۳	۰/۰۰۰۸۶	۰/۰۰۰۸۶	۲/۵
۲/۵	۳۵	۲/۵۸	۲/۸۱	۲/۸۱	۰/۰۰۱۶۵	۰/۰۰۱۶۵	۲/۵
۲/۵	۴۰	۳/۳۹	۳/۲۶	۳/۲۶	۰/۰۰۳۵۲	۰/۰۰۳۵۲	۲/۵

فشار باد بالشتک (bar)	بسامد نوسان (Hz)	در عنصر محدود (g)	بیشینه شتاب صفحه بالائی	در آزمون‌های تجربی (g)	بیشینه شتاب صفحه بالائی	تفاضلات و میانگین	مجدور تفاضل قدر مطلق
۲/۵	۴۵	۴/۳۳	۳/۲۳	۳/۲۳	۰/۰۴۴۳۸	۰/۰۴۴۳۸	۲/۵
۲/۵	۵۰	۴/۲۵	۴/۳۸	۴/۳۸	۰/۰۰۳۵۲	۰/۰۰۳۵۲	۲/۵
۲	۲۵	۱/۳۸	۱/۲۳	۱/۲۳	۰/۰۰۱۵۵	۰/۰۰۱۵۵	۲
۲	۳۰	۲/۰۵	۱/۸۵	۱/۸۵	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۱۱	۲
۲	۳۵	۲/۵۱	۲/۶۵	۲/۶۵	۰/۰۰۲۴۳	۰/۰۰۲۴۳	۲
۲	۴۰	۲/۷۴	۲/۹۷	۲/۹۷	۰/۰۰۱۶۵	۰/۰۰۱۶۵	۲
۲	۴۵	۱/۷۵	۳/۵۶	۳/۵۶	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۲
۳	۵۰	۴/۲۱	۳/۹۹	۳/۹۹	۰/۰۰۰۹۴	۰/۰۰۰۹۴	۳
۳/۵	۲۵	۱/۱۲	۱/۲۶	۱/۲۶	۰/۰۰۲۴۳	۰/۰۰۲۴۳	۳/۵
۳/۵	۳۰	۱/۸۲	۱/۸۹	۱/۸۹	۰/۰۱۴۳۴	۰/۰۱۴۳۴	۳/۵
۳/۵	۳۵	۲/۶۱	۲/۷۳	۲/۷۳	۰/۰۰۴۸۱	۰/۰۰۴۸۱	۳/۵
۳/۵	۴۰	۳/۳۲	۳/۰۹	۳/۰۹	۰/۰۰۱۶۵	۰/۰۰۱۶۵	۳/۵
۳/۵	۴۵	۳/۴۹	۳/۷۷	۳/۷۷	۰/۰۰۸۲۲	۰/۰۰۸۲۲	۳/۵
۳/۵	۵۰	۳/۹۸	۴/۲۰	۴/۲۰	۰/۰۰۰۹۴	۰/۰۰۰۹۴	۳/۵
۴	۲۵	۱/۱۲	۱/۳۷	۱/۳۷	۰/۰۰۳۶۸	۰/۰۰۳۶۸	۴
۴	۳۰	۲/۲۸	۲/۰۵	۲/۰۵	۰/۰۰۱۶۵	۰/۰۰۱۶۵	۴
۴	۳۵	۲/۷۸	۲/۹۵	۲/۹۵	۰/۰۰۰۳۷	۰/۰۰۰۳۷	۴
۴	۴۰	۳/۵۲	۳/۶۰	۳/۶۰	۰/۰۱۱۹۵	۰/۰۱۱۹۵	۴
۴	۴۵	۴/۰۱	۴/۱۳	۴/۱۳	۰/۰۶۹۳۳	۰/۰۶۹۳۳	۴
۴	۵۰	۴/۳۶	۴/۵۴	۴/۵۴	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۹	۴
۲	۲۵	۱/۴۶	۱/۳۳	۱/۳۳	۰/۰۰۳۵۲	۰/۰۰۳۵۲	۲

میانگین قدر مطلق تفاضلات از معادله (۵) به دست می‌آید.

$$ave = \frac{\sum_{i=1}^{30} (x_i - y_i)}{30} = \frac{5.68}{30} = 0.19833 \quad (5)$$

همچنین مقدار انحراف از معیار نیز از معادله (۶) به دست می‌آید.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} (|x_i - y_i| - ave)^2}{30}} = \sqrt{\frac{0.21907}{30}} = 0.08545 \quad (6)$$

شایان ذکر است، در تمامی سطوح مطرح شده در جدول ۷، فشار باد بالشتک ۳ بار است.

جدول ۷ مقادیر سطوح متغیرهای ورودی آزمون‌های حالت پویا

ضریب I	ضریب P	بسامد (Hz)	شماره سطح / نوع متغیر
۰	۰	۲۵	۱
۰,۲	۵۰	۲۷	۲
۰,۴	۱۰۰	۲۹	۳
۰,۶	۱۵۰	۳۱	۴
۰,۸	۲۰۰	۳۳	۵
۱	۲۵۰	۳۵	۶
۱,۲	۳۰۰	۳۷	۷
۱,۴	۳۵۰	۳۹	۸
۱,۶	۴۰۰	۴۱	۹
۱,۸	۴۵۰	۴۳	۱۰
-	-	۴۵	۱۱

بیشترین مقدار دامنه نوسانات در حالت ایستا یعنی زمانی که شار باد ورودی یا خروجی بالشتک صفر است حدود ۲/۷ میلی‌متر بود. هدف از آزمون‌های حالت پویا، کاهش دامنه تا حداکثر مقدار ممکن است. با تغییر ضرایب  $P$  و  $I$  مقدار شار باد ورودی و خروجی بالشتک به ازای واحد جابه‌جائی صفحه بالائی تغییر می‌کند و متعاقباً دامنه نوسان صفحه بالائی نیز تغییر می‌کند. مقدار  $P$  و  $I$  بهینه، مقداری است که دامنه نوسان صفحه بالائی در آن حالت کمینه باشد. پس از هر آزمایش حالت پویا، مقدار دامنه را که جابه‌جائی سنج خطی تشخیص داد، ثبت گردید. به ازای هر مقدار ضرایب  $P$  و  $I$  در فشار باد ۳ بار بالشتک و محدوده بسامدی ۲۵ تا ۴۵ هرتز، یک نمودار حاصل می‌شود. نموداری که بیشینه آن نسبت به بیشینه نمودارهای دیگر کمترین باشد، نمودار بهینه و ضرایب به وجود آورنده آن، ضرایب بهینه خواهد بود. در نمودار شکل ۲۱، سه نمودار منتخب با کمترین بیشینه، بیشترین بیشینه و با بیشینه حد وسط رسم گردیده است. این نمودارها بیانگر دامنه نوسان صفحه بالائی بر حسب بسامد نوسان در ضرایب مختلف  $P$  و  $I$  به ازای جرم ۱۷۰ کیلوگرمی صفحه بالائی است. از نمودار شکل ۲۱ نمایان است که بیشینه نمودار با ضرایب  $P=150$  و  $I=1/2$  کمینه است. در واقع این ضرایب در میان مقادیر در نظر گرفته شده، بهینه‌اند.

مشاهده می‌شود که نتایج تحلیلی با تقریب خوبی به نتایج تجربی در حالت ایستا نزدیک است. با در نظر گرفتن اینکه بسیاری از آزمون‌ها بر روی موتورها در سرعت زاویه ای ۶۰۰۰ دور بر دقیقه (۱۰۰ هرتز) انجام می‌شود و با توجه به اینکه به علت محدودیت تجهیزات آزمایش (محدودیت دور موتور الکتریکی برای تولید تحریک)، حداکثر بسامد مورد بررسی در این پژوهش ۵۰ هرتز است هدف از انجام تحلیل عنصر محدود و مقایسه آن با نتایج تجربی را می‌توان به اینصورت بیان کرد که برای بررسی رفتار بالشتک در بسامدهای بزرگتر از ۵۰ هرتز می‌توان با تقریب خوبی (کمتر از ۱۰ درصد خطا) از نرم افزار آباکوس استفاده کرد.

#### ۵-۴- آزمون‌های حالت پویا

هدف از این مجموعه آزمون‌ها که اصلی‌ترین آنها یافتن بهترین شار باد برای بیشترین جداسازی لرزش است. مدار پایشی در اینجا یک مدار  $PI$  است. متغیرهایی به عنوان ورودی و متغیرهایی به عنوان خروجی مطرح هستند. ابتدا باید این متغیرها مشخص و سپس سطح‌بندی شوند. بعد از سطح‌بندی برنامه آزمون‌ها مشخص می‌شود.

متغیرهای ورودی عبارتند از:

(۱) فشار باد بالشتک

(۲) بسامد نوسان

(۳) مقدار ضریب  $P$  در مدار پایشی

(۴) مقدار ضریب  $I$  در مدار پایشی

تنها متغیر خروجی عبارتست از:

(۱) دامنه نوسانات صفحه بالائی

فشار بهینه بالشتک در آزمون‌های حالت ایستا به دست آمد که برابر با فشار معادل ایستایی است. این فشار به عنوان فشار مبنا در آزمون‌های حالت پویا مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمون‌های حالت پویا با جرم ۱۷۰ کیلوگرمی صفحه بالائی و در فشار ۳ بار که فشار ایستایی برای جرم ۱۷۰ کیلوگرم است انجام شد.

سطح‌بندی مقادیر متغیرهای ورودی برای آزمون‌های حالت پویا با جرم ۱۷۰ کیلوگرمی صفحه بالائی، فشار ۳ بار بالشتک باد و محدوده بسامدی ۲۵ تا ۴۵ هرتز برای آزمایش حالت پویا در جدول ۷ آورده شده است. منظور از مقادیر مختلف در نظر گرفته شده در این جدول برای بسامد تحریک و ضرایب  $P$  و  $I$ ، یافتن مقادیر بهینه  $P$  و  $I$  است. با ضرب تعداد سطوح این متغیرها، تعداد آزمون‌ها به دست خواهد آمد که برابر ۱۱۰۰ آزمایش می‌باشد. ۵۵۰ آزمایش از مجموع آزمایشات تعیین شده انجام شد.

نرم افزار متلب<sup>۱</sup> نشان می‌دهد که به ازای چه مقادیری از  $P$  و  $I$ ، نمودار بیشینه بوده و مقادیر نیروی برقی ورودی و خروجی به پایش‌گر در این نقاط بیشینه به چه میزان است. منبع تغذیه، نیروی برقی‌ای معادل ۵ ولت را برای جابه‌جائی سنج خطی ایجاد می‌کند و چون بازه حرکتی جابه‌جائی سنج خطی ۲۵ میلی‌متر است، بنابراین میزان نیروی برقی ارسال شده به مدار پایش‌گر از طرف جابه‌جائی سنج خطی به ازای یک میلی‌متر جابه‌جائی از معادله (۷) به‌دست می‌آید:

$$\frac{5}{25} = 0.04 \frac{v}{mm} \quad (7)$$

در واقع به ازای هر یک میلی‌متر جابه‌جائی در حسگر جابه‌جائی سنج خطی، علامت ورودی به پایش‌گر ۰/۰۴ ولت است. بنابراین در حالت بهینه نیروی برقی سر غلتک شیر به ازای یک میلی‌متر جابه‌جائی جابه‌جائی سنج خطی از معادله (۸) به‌دست می‌آید:

$$0.04 (v / mm) * 5.1 = 0.204(v / mm) \quad (8)$$

شیر تناسبی به ازای ۵ ولت، ۷۰۰ لیتر بر دقیقه را در فشار ۸ بار می‌دهد. فشار خط در تمام آزمون‌های حالت پویا ۸ بار بود. بنابراین شار باد مبادله شده در حالت بهینه به ازای هر یک میلی‌متر جابه‌جائی جابه‌جائی سنج خطی از معادله (۹) به‌دست می‌آید.

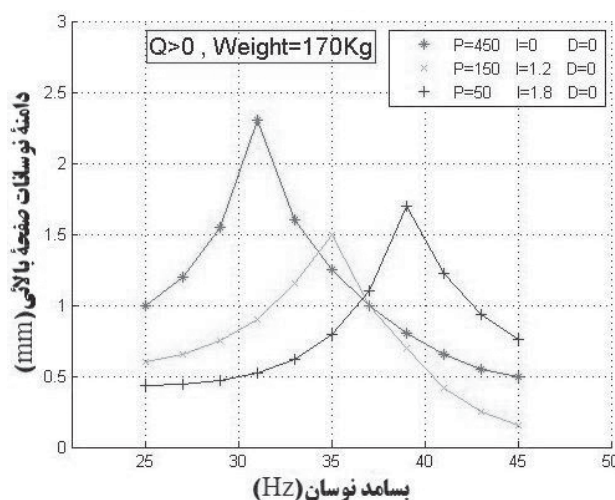
$$\frac{0.204(v / mm) * 700(lit / min)}{5(v)} = \quad (9)$$

$$28.56(lit / (mm \cdot min))$$

یعنی در حالت بهینه به ازای هر میلی‌متر تغییر مکان جابه‌جائی سنج خطی، شیر باید شار بادی معادل ۲۸/۵۶ لیتر بر دقیقه به بالشتک بفرستد یا از آن خارج نماید تا کمترین دامنه برای نوسان صفحه بالائی حاصل شود.

حال باید مقایسه‌ای در یک نمودار بین مقادیر جابه‌جائی در این دو حالت صورت بگیرد:

(۱) مقادیر جابه‌جائی تجربی جرم ۱۷۰ کیلوگرمی از بسامد ۲۵ تا ۴۵ هرتز در فشار ۳ بار بالشتک در حالت ایستا(در این حالت شار باد تبادل شده با بالشتک صفر است).



شکل ۲۱ نمودارهای حاصل از آزمون‌های حالت پویا

حال باید ضریب بزرگنمائی محاسبه شود. هدف از محاسبه این ضریب، به‌دست آوردن میزان شار باد بهینه ورودی و خروجی بالشتک باد به ازای واحد جابه‌جائی صفحه بالائی در نوسانات است. ضریب بزرگنمائی عددی است که مدار پایش‌گر با توجه به مقادیر  $P$  و  $I$ ، مقدار نیروی برقی ورودی را از جابه‌جائی سنج خطی که معرف جابه‌جائی بر حسب میلی‌متر است در آن ضرب می‌کند و به خروجی که نیروی برقی سر غلتک شیر تناسبی است ارسال می‌کند. این بدین معناست که نیروی برقی ارسال شده به سر شیر بادی، تحت تأثیر میزان حرکت جابه‌جائی سنج خطی و ضریب بزرگنمائی است. از طرفی معادله نیروی برقی - شار باد شیر، خطی است. یعنی می‌توان محاسبه نمود که به ازای هر مقدار نیروی برقی ارسال شده به سر شیر، چه مقدار شار باد به بالشتک وارد شده یا از آن خارج می‌شود. بنابراین می‌توان محاسبه نمود که به ازای هر میلی‌متر جابه‌جائی صفحه بالائی، چه مقدار شار باد باید به بالشتک فرستاد یا از آن خارج کرد. با توجه به ضرایب بهینه  $P$  و  $I$  به‌دست آمده، ضریب بزرگنمائی برابر ۵/۱ محاسبه گردید. پایش‌گر PID در هر لحظه یک نیروی برقی از جابه‌جائی سنج خطی دریافت می‌کند و نیروی برقی دیگری را به شیر تناسبی بادی می‌فرستد. ضریب بزرگنمائی از تقسیم "مقدار نیروی برقی خروجی پایش‌گر" بر "مقدار نیروی برقی ورودی به پایش‌گر" به‌دست می‌آید که این مقادیر در هر لحظه به صورت یک فایل متنی به کمک نرم افزار، قابل ذخیره‌سازی است. در واقع در این فایل متنی، در پنج ستون، مقادیر  $P$ ،  $I$ ، نیروی برقی ورودی پایش‌گر و نیروی برقی خروجی پایش‌گر و همچنین ضریب بزرگنمائی(حاصل تقسیم "مقدار نیروی برقی خروجی پایش‌گر" بر "مقدار نیروی برقی ورودی به پایش‌گر") ذخیره شده است. پس از هر آزمون، نمایش نموداری این مقادیر ذخیره شده در

۱- Matlab Software

جدول ۸ مقادیر خطای کلی ابزارهای آزمون‌ها

شماره	نام ابزار	خطای دستگاه		خطای کلی $U$
		حد دقت تکرار پذیری	اندازه‌گیری	
۱	شتاب‌سنج	٪۳	٪۲٫۲	٪۳٫۷۲
۲	جابه‌جائی سنج خطی	٪۲	٪۱	٪۲٫۲۴
۳	شیر تناسبی	٪۱٫۶۵	٪۲٫۵	٪۳

خطای کلی آزمون‌های انجام شده برابر میانگین خطای این سه ابزار اصلی آزمون‌ها است که از معادله (۱۱) به دست می‌آید.

$$U_{total} = \frac{\%3.72 + \%2.24 + \%3}{3} = \%2.99 \quad (11)$$

## ۷- نتیجه گیری

در این پژوهش سامانه‌ای برای فنر بادی بالشتکی ساخته شد و از نتایج تحلیل عنصر محدود و آزمون‌های انجام شده این نتایج استخراج گردید:

(۱) فشار بهینه بالشتک باد: در آزمون‌های انجام شده فشار بهینه بالشتک باد به دست آمد. این فشار، برابر فشار ایستایی بالشتک باد است، یعنی برای بیشترین درصد جداسازی لرزش، بدون استفاده از پایش گر  $PID$ ، باید با توجه به جرم مجموعه روی بالشتک، فشار باد را تنظیم کرد.

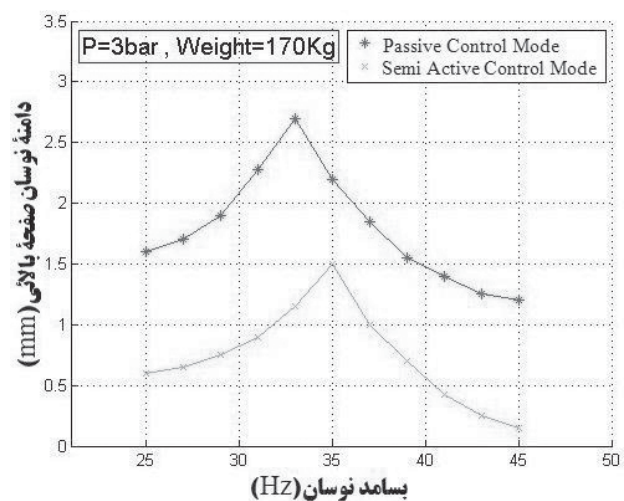
(۲) رفتار بالشتک در تغییرات بسامد نوسان: در مرحله بعدی رفتار بالشتک در بسامدهای بزرگ بررسی شد و این نتیجه حاصل گردید که در فشار ۳ بار و بسامد ۵۰ هرتز، کاهش شتاب صفحه بالائی بالشتک ۷۸٪ است.

(۳) شار باد بهینه شیر تناسبی برای بیشترین جداسازی لرزش: در مرحله نهائی آزمایش، شار باد بهینه شیر تناسبی به ازای یک میلی‌متر جابه‌جائی صفحه بالائی بالشتک، ۲۸/۵۶ لیتر بر (میلی‌متر در دقیقه) به دست آمد. در این شار باد، دامنه جابه‌جائی در بسامد ۴۵ هرتز از حالت ایستا که ۱/۲ میلی‌متر بود به ۰/۱۵ میلی‌متر یعنی حدود ۸۷/۵ درصد کاهش پیدا کرد.

(۴) تحلیل عنصر محدود فنر بادی بالشتکی: تحلیل عنصر محدود نیز انجام شد و در آن حالت ایستا شبیه‌سازی و تحلیل گردید. میانگین قدر مطلق اختلاف نتایج عنصر محدود با نتایج تجربی حدود ۰/۱۹۸ با انحراف معیار ۰،۰۸۵ بود که حاکی از تطابق بسیار نزدیک این دو به هم است. در تحلیل دیگر، بسامد طبیعی مجموعه به دست آمد.

(۲) مقادیر جابه‌جائی تجربی جرم ۱۷۰ کیلوگرمی از بسامد ۲۵ تا ۴۵ هرتز در فشار ۳ بار بالشتک با پایشگر  $PID$  و ضرایب  $P$  و  $I$  بهینه به دست آورده شده (حالت پویا).

این مقایسه، توانمندی پایش گر  $PID$  را در کاهش دامنه نوسانات صفحه بالائی نشان می‌دهد. شکل ۲۲ نمودار مقایسه شده آن دو حالت است. بیشترین درصد کاهش دامنه در فشار باد ۳ بار و بسامد ۴۵ هرتز واقع شده که برابر ۸۷/۵٪ کاهش دامنه است و این بدین معناست که حالت بهینه پویای به دست آمده، دامنه نوسانات را ۸۷/۵٪ کاهش می‌دهد.



شکل ۲۲ نمودار مقایسه حالت بهینه پویا و حالت ایستا با شرایط مشابه در فشار و بسامد

## ۶- تحلیل خطای آزمون‌ها

میزان خطای کلی هر آزمایش که با  $U$  نمایش داده می‌شود به توجه با مقادیر حد دقت تکرار پذیری آزمون‌ها یا  $P$  و خطای دستگاه اندازه گیری یا  $B$  از معادله (۱۰) به دست می‌آید.

$$U = \sqrt{B^2 + P^2} \quad (10)$$

در آزمون‌های انجام شده، سه ابزار مهم وجود دارند که خطای کلی آزمون‌های انجام شده به آنها بستگی دارد. این ابزارها عبارتند از:

(۱) شتاب‌سنج

(۲) جابه‌جائی سنج خطی

(۳) شیر تناسبی بادی

حد دقت تکرار پذیری و خطای دستگاه اندازه گیری هر کدام از این ابزارها در جدول ۸ آمده است. میزان خطای کلی هر یک نیز در ستون آخر جدول آمده است.

Toshinori Fujita, "Study on Dynamic characteristic analysis of air spring with Auxiliary Chamber", *JSAE Review* (1999).

9. G. Quaglia, M. Sorli, et al., "Air suspension dimensionless analysis and design producer", *Vehicle System Dynamics* (2000).

10. Quaglia, G. and Sorli, M., "Experimental and theoretical analysis of an air spring with auxiliary reservoir", *Proc. Of the 6th International Symposium on Fluid Control Measurement and Visualization* (2001).

11. Jeung-Hoon Lee & Kwang-Joon Kim, "Modeling of nonlinear complex stiffness of dual-chamber pneumatic Spring for precision vibration isolations", *Journal of sound and vibration* (2006).

12. Tomonori Kato, et al, "Active control of a pneumatic isolation table using model following control and a pressure differentiator", *Journal of sound and vibration* (2007).

13. Jeung-Hoon Lee & Kwang-Joon Kim, "A method of transmissibility design for dual chamber pneumatic Vibration isolator", *Journal of sound and vibration* (2009).

14. Weforma Company, 2003, Available from: [www.weforma.com](http://www.weforma.com)

15. CFM Company Catalogue, 2004, Available from: [www.cfmcompany.com](http://www.cfmcompany.com)

16. Barry Controls Company, 2009, "Iso\_Select", Available from: [http://www.barrycontrols.com/UserFiles/File/Engineering/iso\\_select.pdf](http://www.barrycontrols.com/UserFiles/File/Engineering/iso_select.pdf)

17. TMC Company, 2008, "Technical Background", Available from: [www.TMC.com](http://www.TMC.com)

18. Horiba Company, 2009, Available from: [www.Horiba.com/search/Engine\\_Test\\_Stand](http://www.Horiba.com/search/Engine_Test_Stand)

19. Zargar, B. "Model Development, Validation and Non-linear Control of Pneumatic Suspensions", *MSc. Thesis, University of Ottawa* (2007).

20. MALIN PRESTHUS. "Derivation of Air Spring Model Parameters for Train Simulation", *MSc. Thesis, LULEA University of Technology* (2006).

21. Karl J. Astrom, Tore Hagglun, "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning", *August* (2005).

22. Contitech Company Air Spring Catalogue, 1998, Vibration Isolation, Available from: [www.contitech.de/pages/produkte/duftfedersysteme/luftfedersysteme\\_en.html](http://www.contitech.de/pages/produkte/duftfedersysteme/luftfedersysteme_en.html)

23. Abaqus Software help/Examples/Static stress/Displacement Analyses/Modeling an Air Spring

نهایتاً از فنر بادی بالشتکی برای پایش لرزش‌ها در بسامدهای بزرگ استفاده شد و در بسامد ۴۵ هرتز تا ۸۷/۵ در صد از لرزش، جداسازی گردید. از نتایج این پژوهش می‌توان سامانه ای ساخت که برای پایش لرزش پایه‌های چدنی یا فولادی آزمون موتور مورد استفاده قرار گیرد. تنها مسأله اینست که اجزای پایش‌گر که شامل حسگر جابه‌جائی سنج خطی، مدار پایش‌گر و شیر تناسبی بادی است بایستی قادر به پاسخگویی در بسامد ۱۰۰ هرتز که بسامد نوسانات در اتاق‌های آزمون موتور است باشند.

### سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو که ابزار آزمایش‌ها و نیز راهنمایی‌های فنی و علمی راجع به موضوع تحقیق را فراهم و ارائه کرده، کمال تشکر و قدردانی را دارد. همچنین از جناب آقایان مهندس نصیری، مهندس امامی، مهندس ثنائی، مهندس محمدی، آقای امین و آقای زارع در مجموعه تحقیقات موتور ایران خودرو که اینجانب را در اجرای موفق پژوهش یاری نمودند صمیمانه قدردانی می‌نماید.

### References:

1. Tanakorn Tantanawat, Zheli, Sridhar Kota, "Application of Compliant Mechanisms to Active Vibration Isolation Systems", *International Design Engineering Technical Conference* (2008)
2. R. D. Cavanaugh, "Air suspension and servo-controlled isolation systems", *Shock and Vibration Handbook, Volume 2*, (1961).
3. R. A. WAILER and P. P. BENHAM, "Fatigue machine mounted on air springs", *Engineering, Lond*, (1963).
4. J.I.SOLIMAN and D. TAJER-ARDABILI "Self-damped pneumatic isolator for Variable frequency excitation", *Journal of Mechanical Engineering Science* (1966).
5. D.GEE-Clough and R.A.Waller, "An improved self-damped pneumatic isolator", *J Sound and Vib.* (1968).
6. M.S. Hundal, "Passive Pneumatic shock Isolator: Analysis and Design", *J Sound and Vib.* (1982).
7. Bachrach Bi, Rivin E. "Analysis of a damped pneumatic spring", *J Sound and Vib.* (1983).
8. Katsuya Toyofuku, Chuuji Yamada, Toshiharu Kagawa,

# Vibration Control by a Semi-Active Air Spring System in High Frequency by PID Controller in Engine Test Cell

**M. R. Ghassemi**

MSc. Graduated of Mechanical Engineering  
Tarbiat Modares University  
mrgh\_63@yahoo.com

**Y. Hojjat\***

Associate Professor  
Department of Mechanical Engineering  
Tarbiat Modares University

\*Corresponding Authors

Received: Mar. 05.2011

Accepted in Revised Form: May. 24.2011

## Abstract

Today there are different vibration isolators used in industries according to the weight and excitation frequency of the machines which have vibration. One of them is Air Spring which is in two types: Convoluted air spring and membrane air spring.

Convoluted air springs are used to control vibrations in low frequency (usually lower than 10 Hz) and the membrane ones are used in high frequency (upper than 20 Hz). Middle frequency is between 10 and 20 Hz. Other vibration isolators are being used for this frequency range.

In this paper an air spring system was made using LVDT, as the linear measurement sensor, accelerometer with PID controller and convoluted air spring. As mentioned convoluted air springs are used in low frequency but by using conclusions of this research we can use it in high frequency (about 50 Hz). Finally, an optimum vibration isolator has been made which reduces the vibration amplitude from 2.7mm to 0.15mm (about %87.5 reduction in vibration amplitude). Finite element analysis results have been compared with experimental results. There is a good adaption with approximately %8 error. This research has been done according to "Irankhodro Powertrain Company" request for controlling of engine test stand vibration.

*Keywords: Air Spring, Pneumatic Vibration Isolator, Semi-Active Control, PID Controller, Vibration Control, Convolution Air Spring*