

:

:

## حکیده

مزیت‌های زیاد سیستم‌های تعلیق بادی غیرفعال در مقایسه با سیستم‌های مکانیکی باعث افزایش تقاضا برای استفاده از این سیستم‌ها در خودروهای سنگین مخصوصاً اتوبوس شده است. اما این مزیت‌ها، خیلی زیاد به انتخاب صحیح اجزاء سیستم وابسته است. به طوری که انتخاب درست ابعاد فنربادی، حجم مخزن ذخیره، مقاومت اوریفیس، سختی پیچشی میله موج‌گیر و فشار کمپرسور در سیستم‌های تعلیق بادی نقش مهمی در بهبود کیفیت خوش‌سواری و فرمان‌پذیری خودرو دارد.

در این پروژه ابتدا کلیه معادلات غیرخطی مربوط به اجزاء سیستم تعلیق بادی بدست آمده و با توجه به معادلات بدست آمده؛ معادلات مدل  $1/4$  دو درجه آزادی و  $1/2$  چهار درجه آزادی غیرخطی خودرو ارائه می‌گردد. سپس مدل‌های بدست آمده خطی‌سازی شده و از مدل‌های خطی بدست آمده هنگام عبور از جاده هارمونیک، برای یافتن معادلات تحلیلی بیان‌کننده رفتار دینامیکی سیستم استفاده شده است. در ادامه با استفاده از معادلات تحلیلی بدست آمده و تعریف چند پارامتر بی‌بعد، مدل  $1/4$  بی‌بعد سیستم نوشته خواهد شد. مدل بی‌بعد درک بهتری در مورد تاثیر پارامترهای تعیین‌کننده بر روی رفتار دینامیکی سیستم ایجاد خواهد نمود، همچنین امکان استفاده از روش‌های جدید بهینه‌سازی فراهم خواهد شد. به منظور بهینه‌سازی اجزاء سیستم در این پروژه از روش بهینه‌سازی RMS شتاب جرم فنربندی شده و RMS جابجایی نسبی بین جرم فنربندی شده و فنربندی نشده استفاده شده است و این روش بهینه‌سازی با روش‌های کلاسیک استفاده شده در سیستم‌های تعلیق بادی مقایسه شده است.

در این پروژه با ارائه مدل دینامیک رول سیستم تعلیق بادی و محاسبه رول‌گین، به منظور تعیین سختی پیچشی میله موج‌گیر استفاده شده است و در پایان به منظور استفاده طراحان، کلیه مراحل طراحی (انتخاب ابعاد فنر، حجم مخزن ذخیره، مقاومت اوریفیس، سختی پیچشی میله موج‌گیر و فشار اولیه سیستم) در یک نرم‌افزار تخصصی که بدین منظور تدوین گشته، ارائه می‌گردد.

**فصل اول: تکنولوژی سیستم‌های تعلیق بادی**

|    |   |
|----|---|
| ۲  | ۱-۱ کلیات و تعاریف .....  |
| ۶  | ۲-۱ سیستم‌های تعلیق بادی .....                                    |
| ۹  | ۱-۲-۱ عملکرد سیستم‌های تعلیق بادی .....                           |
| ۱۶ | ۲-۲-۱ مزیت سیستم تعلیق بادی نسبت به سیستم‌های تعلیق مکانیکی ..... |
| ۱۸ | ۳-۲-۱ سیستم‌های تعلیق بادی در خودروهای سواری .....                |
| ۱۹ | ۴-۲-۱ سیستم‌های تعلیق بادی در خودروهای سنگین .....                |

**فصل دوم: مروری بر کارهای انجام شده**

|    |                                  |
|----|----------------------------------|
| ۲۴ | ۱-۲ مقدمه .....                  |
| ۲۴ | ۲-۲ مروری بر کارهای گذشته .....  |
| ۲۸ | ۲-۲ هدف از انجام این تحقیق ..... |

**فصل سوم: مدل‌سازی**

|    |   |
|----|---|
| ۳۱ | ۱-۳ مقدمه .....                                     |
| ۳۱ | ۲-۳ مدل‌های غیرخطی .....                            |
| ۳۱ | ۱-۲-۳ مدل‌سازی عملکرد اجزاء سیستم تعلیق بادی .....  |
| ۳۶ | ۲-۲-۳ مدل ¼ غیرخطی .....                            |
| ۳۷ | ۳-۲-۳ مدل ½ غیرخطی .....                            |
| ۴۲ | ۳-۳ مدل‌های خطی .....                               |
| ۴۲ | ۱-۳-۳ خطی‌سازی معادلات اجزاء سیستم تعلیق بادی ..... |
| ۴۷ | ۲-۳-۳ مدل ¼ خطی .....                               |
| ۴۹ | ۳-۳-۳ مدل ¼ بی‌بعد .....                            |
| ۵۱ | ۴-۳-۳ مدل ½ خطی .....                               |
| ۵۲ | ۵-۳-۳ مدل دینامیک غلت .....                         |

**فصل چهارم: شبیه‌سازی**

|    |                                      |
|----|--------------------------------------|
| ۵۷ | ۱-۴ مقدمه .....                      |
| ۵۷ | ۲-۴ شبیه‌سازی مدل ¼ تعلیق بادی ..... |
| ۵۹ | ۱-۱-۴ مدل غیرخطی .....               |

|    |   |
|----|---|
| ۶۵ | ..... ۲-۱-۴ مدل خطی                       |
| ۶۸ | ..... ۳-۱-۴ مقایسه نتایج مدل خطی و غیرخطی |
| ۶۹ | ..... ۴-۱-۴ بررسی صحت مدل                 |
| ۷۱ | ..... ۳-۴ شبیه‌سازی مدل $1/2$ تعلیق بادی  |
| ۷۲ | ..... ۴-۴ شبیه‌سازی مدل غلت تعلیق بادی    |

### فصل پنجم: بهینه‌سازی

|     |  |
|-----|--|
| ۸۰  | ..... ۱-۵ مقدمه  |
| ۸۰  | ..... ۲-۵ روش‌های بهینه‌سازی                             |
| ۸۰  | ..... ۱-۲-۵ روش حداقل‌سازی ماکزیمم نسبت جابجایی          |
| ۸۳  | ..... ۲-۲-۵ روش اعداد جادویی                             |
| ۸۴  | ..... ۳-۲-۵ بهینه‌سازی بر اساس روش RMS                   |
| ۸۷  | ..... ۳-۵ مطالعه موردی                                   |
| ۸۴  | ..... ۱-۳-۵ بکارگیری روش حداقل‌سازی ماکزیمم نسبت جابجایی |
| ۹۴  | ..... ۲-۳-۵ بکارگیری روش RMS                             |
| ۱۰۵ | ..... ۴-۵ مقایسه نتایج روش‌های مختلف                     |

### فصل ششم: طراحی

|     |                                      |
|-----|--------------------------------------|
| ۱۱۰ | ..... ۱-۶ مقدمه                      |
| ۱۱۰ | ..... ۲-۶ الگوریتم طراحی             |
| ۱۱۴ | ..... ۳-۶ ملاحظات طراحی              |
| ۱۱۷ | ..... ۳-۶ نرم‌افزار ASDS             |
| ۱۱۷ | ..... ۱-۴-۶ نصب نرم‌افزار            |
| ۱۲۰ | ..... ۲-۳-۶ ابزارها                  |
| ۱۲۳ | ..... ۳-۳-۶ وارد نمودن اطلاعات طراحی |
| ۱۲۴ | ..... ۴-۳-۶ نتایج خروجی              |

### فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ادامه کار

|     |                           |
|-----|---------------------------|
| ۱۲۹ | ..... ۱-۷ مقدمه           |
| ۱۲۹ | ..... ۲-۷ نتیجه‌گیری      |
| ۱۳۰ | ..... ۳-۷ ارائه پیشنهادات |
| ۱۳۲ | ..... مراجع               |
| ۱۳۶ | ..... پیوست‌ها            |

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ سیستم تعلیق به عنوان واسط بین چرخ و بدنه خودرو ..... ۳
- شکل ۲-۱ انتقال ارتعاشات به سرنشین ..... ۴
- شکل ۳-۱ درجات آزادی خودرو ..... ۵
- شکل ۴-۱ نمونه اولیه فنر هوایی ساخته شده در سال ۱۸۷۴ میلادی ..... ۸
- شکل ۵-۱ عملکرد سیستم تعلیق بادی ..... ۸
- شکل ۶-۱ خط پنماتیکی و اجزاء سیستم تعلیق بادی ..... ۹
- شکل ۷-۱ اتصالات و شیرهای هیدرولیکی در اکسل جلو ..... ۱۱
- شکل ۸-۱ اشکال مختلف فنر بادی ..... ۱۲
- شکل ۹-۱ انواع فنر بادی (a) bellow spring, (b) rolling diaphragm ..... ۱۲
- شکل ۱۰-۱ ساختمان فنربادی کیسه ای ..... ۱۳
- شکل ۱۱-۱ شیر کنترل ارتفاع ..... ۱۵
- شکل ۱۲-۱ شیر مجزا کننده ..... ۱۵
- شکل ۱۳-۱ تغییرات فرکانس طبیعی سیستم تعلیق نسبت به تغییرات جرم فنربندی شده ..... ۱۷
- شکل ۱۴-۱ سیستم تعلیق بادی نصب شده بر روی خودروی سواری بنز C240 ..... ۱۹
- شکل ۱۵-۱ ساختار سه جزئی اتوبوس ..... ۲۱
- شکل ۱۶-۱ سیستم تعلیق بادی نصب شده بر روی اکسل اتوبوس ولو HSK653 ..... ۲۲
- شکل ۱-۲ شماتیک سیستم تعلیق بادی ..... ۲۵
- شکل ۱-۳ مقایسه مدل ¼ دو درجه آزادی تعلیق مکانیکی و تعلیق بادی ..... ۳۳
- شکل ۲-۳ مقایسه بین نیروی وارد شده بر چرخ و فنر ..... ۳۶
- شکل ۳-۳ مقایسه مدل ¼ دو درجه آزادی تعلیق مکانیکی و تعلیق بادی ..... ۳۶
- شکل ۴-۳ مقایسه بین نیروی وارد شده بر چرخ و فنر ..... ۳۷
- شکل ۵-۳ مدل ½ تعلیق بادی خودرو ..... ۳۸
- شکل ۶-۳ دیاگرام آزاد جرم فنربندی شده ..... ۴۰
- شکل ۷-۳ شماتیک خودرو ..... ۴۱
- شکل ۸-۳ مدل ½ غلت تعلیق بادی ..... ۵۲
- شکل ۱-۴ تغییرات سطح موثر بر اساس ارتفاع ..... ۵۸
- شکل ۲-۴ تغییرات حجم فنر بر اساس ارتفاع ..... ۵۸
- شکل ۳-۴ نمودار بلوکی سیستم ..... ۵۹
- شکل ۴-۴ اجزاء استفاده شده در مدل سازی فنر بادی ..... ۶۰
- شکل ۵-۴ پاسخ فرکانسی مدل غیر خطی (  $[C] = m^3 / (sPa) ANR |x| = 2mm, n=1.4$  ) ..... ۶۱

- شکل ۴-۶ جابجایی جرم فنربندی شده در اثر اعمال ورودی پله  $(u(t)=0.01 \text{ m})$  ..... ۶۳
- شکل ۴-۷ جابجایی جرم فنربندی شده در اثر اعمال ورودی پله  $(u(t)=0.002 \text{ m})$  ..... ۶۳
- شکل ۴-۸ فشار داخلی فنر بادی در اثر اعمال ورودی پله بر اساس C های مختلف ..... ۶۴
- شکل ۴-۹ فشار داخلی مخزن ذخیره در اثر اعمال ورودی پله بر اساس C های مختلف ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۰ پاسخ فرکانسی  $(n = 1.4, [R_F] = Pa/(Kg/s))$  ..... ۶۵
- شکل ۴-۱۱ نمودار تاخیر فازی پاسخ فرکانسی سیستم  $(n = 1.4, [R_F] = Pa/(Kg/s))$  ..... ۶۵
- شکل ۴-۱۲ پاسخ فرکانسی مدل  $(n = 1.4, R_F = \infty Pa/(Kg/s))^{1/4}$  ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۳ پاسخ فرکانسی مدل  $(n = 1.4, R_F = 0 Pa/(Kg/s))^{1/4}$  ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۴ پاسخ فرکانسی سیستم (الف) حوزه فرکانس پایین، (ب) حوزه فرکانس بالا ..... ۶۷
- شکل ۴-۱۵ مقایسه مدل خطی و غیرخطی  $(R_F = 8 * 10^6 \Leftrightarrow C = 5 * 10^{-9})$  ..... ۶۸
- شکل ۴-۱۶ مقایسه مدل خطی و غیرخطی  $(R_F = 0.5 * 10^6 Pa/(Kg/s) \Leftrightarrow C = 80 * 10^{-9} m^3/(s.Pa))$  ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۷ (الف) مدل ۱/۴ دو درجه آزادی (ب) مدل ۱/۴ یک درجه آزادی ..... ۷۰
- شکل ۴-۱۸ پاسخ فرکانسی مدل یک درجه آزادی و دو درجه آزادی  $(R_F = 0.5e6)$  ..... ۷۰
- شکل ۴-۱۹ پاسخ فرکانسی مدل یک درجه آزادی و دو درجه آزادی  $(R_F = 0.5e6)$  ..... ۷۱
- شکل ۴-۲۰ مدل ۱/۲ ساخته شده در مطلب سیمولینک ..... ۷۲
- شکل ۴-۲۱ فاصله بین دو اکسل ..... ۷۲
- شکل ۴-۲۲ (الف) ورودی سیستم تعلیق عقب، (ب) ورودی سیستم تعلیق جلو ..... ۷۴
- شکل ۴-۲۳ جابجایی جرم فنربندی شده ..... ۷۴
- شکل ۴-۲۴ زاویه کله زنی جرم فنربندی شده ..... ۷۵
- شکل ۴-۲۵ جابجایی جرم فنربندی نشده تعلیق جلوی مدل ..... ۷۵
- شکل ۴-۲۶ جابجایی جرم فنربندی نشده تعلیق عقب مدل ..... ۷۶
- شکل ۴-۲۷ مدل دینامیک غلت ساخته شده در مطلب سیمولینک ..... ۷۷
- شکل ۴-۲۸ زاویه غلت زنی جرم فنربندی شده ..... ۷۷
- شکل ۴-۲۹ تغییرات  $\varphi_{ss}$  نسبت به تغییرات شتاب جانبی  $a_y$  ..... ۷۸
- شکل ۵-۱ روش مینیمم مساحت زیر منحنی  $\mu$  ..... ۸۱
- شکل ۵-۲ روش مینیمم جابجایی نسبی ..... ۸۲
- شکل ۵-۳ محاسبه مساحت زیر منحنی شتاب جرم فنربندی شده  $(u)$  ..... ۸۶
- شکل ۵-۴ محاسبه مساحت زیر نمودار جابجایی نسبی  $(\eta)$  ..... ۸۶
- شکل ۵-۵ منحنی جابجایی جرم فنربندی شده به دامنه ورودی سیستم  $(u)$  نسبت به نسبت فرکانسی  $(r)$  ..... ۹۱
- شکل ۵-۶ کاهش ماکزیمم جابجایی با افزایش  $\varepsilon_2$  ..... ۹۲
- شکل ۵-۷ تغییرات  $\varepsilon_4$  بهینه نسبت به  $\varepsilon_2$  ..... ۹۲
- شکل ۵-۸ کاهش ماکزیمم جابجایی با افزایش مقدار  $\varepsilon_3$  ..... ۹۳

- شکل ۵-۹ تغییرات  $U/\phi$  نسبت به  $\varepsilon_2$  و  $\varepsilon_4$  ..... ۹۵
- شکل ۵-۱۰ تابع  $U=f(\phi)$  بر حسب  $\varepsilon_2$  ثابت و  $\varepsilon_4$  متغیر ..... ۹۶
- شکل ۵-۱۱ مکان هندسی نقاط مینیمم تابع  $U=f(\phi)$  بر حسب  $\varepsilon_2$  ثابت و  $\varepsilon_4$  متغیر ..... ۹۷
- شکل ۵-۱۲ مقدار بهینه  $\varepsilon_4$  ..... ۹۷
- شکل ۵-۱۳ مقدار بهینه  $\varepsilon_2$  ..... ۹۸
- شکل ۵-۱۴ تغییرات  $\varepsilon_4$  بهینه بر اساس  $\varepsilon_2$  بهینه شده ..... ۹۸
- شکل ۵-۱۵ تغییرات تابع  $U=f(\phi)$  نسبت به تغییرات  $\varepsilon_3$  ..... ۹۹
- شکل ۵-۱۶ تغییرات تابع  $U=f(\phi)$  نسبت به تغییرات  $\varepsilon_1$  ..... ۹۹
- شکل ۵-۱۷ تغییرات  $\varepsilon_4$  بهینه بر اساس  $\varepsilon_2$  بهینه شده با تغییر در  $\varepsilon_1$  ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۱۸ نقاط انتخاب شده برای بررسی صحت نتایج بهینه‌سازی RMS ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۱۹ جابجایی جرم فنربندی شده در هر سه سیستم تعلیق (الف: ناحیه فرکانس پایین، ب: ناحیه فرکانس بالا) ..... ۱۰۲
- شکل ۵-۲۰ شتاب جرم فنربندی شده در هر سه سیستم تعلیق ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۲۱ جابجایی نسبی بین جرم فنربندی شده و فنربندی نشده در هر سه سیستم تعلیق ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۲۲ پاسخ زمانی مدل ۱/۴ هر سه سیستم تعلیق به ورودی پله‌ای ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۲۳ پاسخ زمانی جابجایی جرم فنربندی شده ( $u$ ) مدل ۱/۴ هر دو سیستم به ورودی پله‌ای ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۲۴ شتاب جرم فنربندی شده ( $u$ ) هر دو سیستم تعلیق در اثر ورودی پله ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۲۵ جابجایی نسبی ( $l$ ) هر دو سیستم تعلیق در اثر ورودی پله‌ای ..... ۱۰۷
- شکل ۶-۱ فاصله بین جرم فنربندی شده و جرم فنربندی نشده ..... ۱۱۱
- شکل ۶-۲ الگوریتم طراحی ..... ۱۱۲
- شکل ۶-۳ Auto run نصب نرم‌افزار ..... ۱۱۸
- شکل ۶-۴ پنجره شروع نصب نرم‌افزار ..... ۱۱۸
- شکل ۶-۵ پنجره نصب نرم‌افزار ..... ۱۱۹
- شکل ۶-۶ انتخاب مسیر نصب بر روی All Programs ..... ۱۲۰
- شکل ۶-۷ پنجره اصلی نرم‌افزار ..... ۱۲۱
- شکل ۶-۸ پنجره انتخاب نوع فنر ..... ۱۲۱
- شکل ۶-۹ پنجره وارد نمودن داده‌های محیطی ..... ۱۲۲
- شکل ۶-۱۰ پنجره وارد نمودن داده‌های اولیه ..... ۱۲۳
- شکل ۶-۱۱ مکان هندسی نقاط بهینه در نمودار RMS ..... ۱۲۵
- شکل ۶-۱۲ نمودار جابجایی نسبی ..... ۱۲۶
- شکل ۶-۱۳ داده‌های نهایی مدل ..... ۱۲۶
- شکل ۶-۱۴ پنجره طراحی میله موج‌گیر ..... ۱۲۷

## فهرست جداول

|  |     |
|--|-----|
| جدول ۱-۱ انواع فنر بادی موجود در بازار .....                                   | ۱۲  |
| جدول ۳-۱ مقدار ضرایب $i_m$ .....   | ۴۱  |
| جدول ۳-۲ مشخصات نقطه خطی سازی .....  | ۴۲  |
| جدول ۳-۳ پارامترهای بی‌بعد مورد استفاده .....                                  | ۴۹  |
| جدول ۴-۱ اطلاعات لازم برای مدل‌سازی .....                                      | ۵۷  |
| جدول ۴-۲ ثابت‌های مورد نیاز برای حل مسئله نمونه .....                          | ۷۳  |
| جدول ۵-۱ مقدار عددی پارامترهای انتخاب شده برای نقاط ۱، ۲ و ۳ .....             | ۱۰۱ |
| جدول ۵-۲ مقادیر عددی پارامترهای بی‌بعد انتخاب شده به منظور مقایسه دو روش ..... | ۱۰۶ |
| جدول ۶-۱ معلومات و مجهولات مسئله طراحی .....                                   | ۱۱۰ |



# ۱ تکنولوژی سیستم‌های تعلیق بادی

## ۱-۱ کلیات و تعاریف

چهار دهه تحقیقات در مورد سیستم تعلیق خودرو حاوی اطلاعات زیادی در زمینه طراحی، انتخاب اجزاء و بهینه‌سازی عملکرد این سیستم‌ها می‌باشد که هر گوشه‌ای از آن شاهد تلاش و کوشش محققان این حوزه است. این تحقیقات در زمینه آنالیز عملکرد دینامیکی خودرو و بررسی آن در چهار نوع سیستم تعلیق مختلف (غیر فعال<sup>۱</sup>، نیمه فعال<sup>۲</sup>، فعال<sup>۳</sup> و خود تنظیم<sup>۴</sup>) صورت پذیرفته است.

در سال ۱۹۹۵ Elbeheiry و همکارانش [۱] اطلاعات کاملی در مورد این چهار نوع سیستم تعلیق، تاریخچه افراد و شرکت‌هایی که در این زمینه فعال هستند را ارائه نمودند.

در بحث سیستم تعلیق خودرو نیاز به بررسی کارکرد این سیستم در خودرو و تعریف بعضی مفاهیم پایه مورد نیاز در طراحی این سیستم‌ها مانند درجات آزادی، جرم فنربندی شده، جرم فنربندی نشده، مرکز و محور غلت، می‌باشد که در زیر به بررسی این مفاهیم پرداخته می‌شود.

- کارکرد سیستم تعلیق در خودرو

سیستم تعلیق در خودرو به طور کلی سه کارکرد عمده زیر را بر عهده دارد [۲]:

الف) جداسازی<sup>۵</sup>:

سیستم تعلیق واسط بین تاپر و اتاق خودرو است (شکل ۱-۱). ارتعاشات وارد شده بر تاپر از طرف جاده توسط سیستم تعلیق به اتاق خودرو وارد می‌شوند. هرچه سیستم تعلیق بتواند به عنوان یک فیلتر بهتری نسبت به ارتعاشات ورودی عمل نماید و ارتعاشات وارد شده به بدنه را کاهش دهد می‌تواند راحتی سفر بیش‌تری برای سرنشینان خودرو ایجاد نماید. ایجاد راحتی سفر بیش‌تر برای یک خودرو بیان‌گر کمیت خوش‌سواری<sup>۶</sup> است.

خوش‌سواری مرتبط با لرزه‌های خودرو بر اثر ناهمواری‌های جاده و دیگر منابع آشفتگی، تاثیرات آن بر سرنشین و جداسازی سرنشین از لرزه‌های خودرو است.

<sup>1</sup> Passive

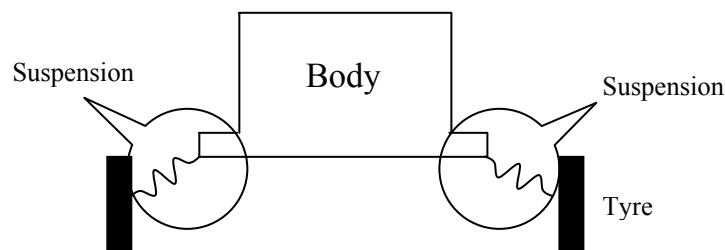
<sup>2</sup> Semi active

<sup>3</sup> Active

<sup>4</sup> Load leveling

<sup>5</sup> Isolation

<sup>6</sup> Ride Comfort

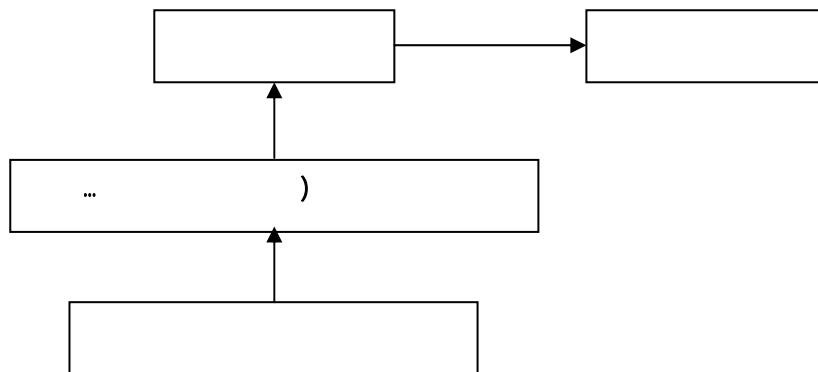


شکل ۱-۲ سیستم تعلیق به عنوان واسطه بین چرخ و بدنه خودرو

خودروهای جاده‌ای در گستره حرکتی مجاز خود می‌توانند در معرض پهنه پهنه گسترده‌ای از لرزش‌ها و ارتعاشات قرار گیرند. این ارتعاشات از طریق حواس لامسه، بینایی و شنوایی به سرنشینان منتقل می‌شود. کلمه سواری در برگزیده برانگیزش‌های بساوی و بینایی است، در حالیکه ارتعاشات شنوایی در پهنه نویزهایی صوتی قرار می‌گیرد. مساله ارتعاش یک از مهم‌ترین معیارها و سنجه‌هایی است که خریدار با توجه به آن درباره طراحی و کیفیت ساخت خودرو قضاوت می‌کند. از آنجا که این قضاوت سلیقه‌ای می‌باشد، بزرگترین مشکل را در مهندسی طراحی خودرو در برخورد با مقوله خوش سواری خودرو، وابسته به درک ریشه‌های برانگیزش خودرو، دینامیک رفتار لرزشی خودرو و احساس بدن انسان از سواری و ارتعاشات اعمالی می‌باشد. هدف از بررسی آسایش لرزشی خودرو، یافتن اصولی کلی است که به کمک آن‌ها بتوان لرزش‌های سرنشین خودرو را به گونه‌ای کنترل کرد که احساس ناراحتی سرنشین از یک اندازه مشخص بیش‌تر نشود. برای دستیابی به این اهداف، نیاز به دانش و آگاهی کافی درباره احساس انسان از ارتعاشات، رفتار لرزشی خودرو و ویژگی‌های سطح جاده است. کیفیت آسایش خودرو به احساس سرنشین هنگام حرکت بر روی جاده وابسته است.

شاخص انسانی خوش سواری خودرو، شتاب اعمالی به سرنشین است. این شتاب در برگزیده شتاب عمودی بدنه و شتاب زاویه این کله‌زنی خودرو است. برگزینی مرز آسایش انسان (سرنشین خودرو) به سبب نایکسانی احساس افراد از لرزه‌ها و نبود یک روش پذیرفته شده و عمومی برای ارزیابی پاسخ انسان به ارتعاشات دشوار می‌باشد. استانداردهای مختلفی برای مرزهای آسایشی و واکنش انسان به لرزه‌های اعمالی نگاشته شده که بر اساس استاندارد انجمن مهندسی خودرو (SAE) بصورت زیر دسته‌بندی شده است:

حد آسایش: حدی که انسان می‌تواند اعمال معمولی روزمره را به راحتی انجام دهد.  
 حد خستگی: حدی که پس از آن انجام کارهای دقیق به خطر می‌افتد.  
 حد تحمل: حدی که پس از آن به انسان حالت سرگیجه و بیهوشی دست می‌دهد.  
 فرکانس طبیعی بدن انسان ( حد آسایش) بر پایه استاندارد ISO 2631 بین ۴ تا ۸ هرتز می‌باشد.



شکل ۱-۲ انتقال ارتعاشات به سر نشین

#### ب) پایداری<sup>۱</sup>

حفظ پایداری خودرو در هنگام حرکت عمودی، غلت‌زنی و کله‌زنی بر یک مسیر مشخص به مشخصات سیستم تعلیق خودرو بستگی دارد. شاخص پایداری خودرو فرمان‌پذیری<sup>۲</sup> خودرو است، رفتار خودرو باید به گونه‌ای محدود شود که فرمان‌پذیری خودرو را مخدوش نماید.

#### چ) حفظ تماس موثر چرخ با جاده<sup>۳</sup>

در برخورد با ناهمواری‌های جاده چرخ‌ها تلاش می‌کنند تا از شکل پروفیل جاده پیروی نمایند، اما ممکن است که از جاده کنده شده و در نتیجه سبب کاهش کنترل‌پذیری خودرو گردند. شاخص تماس موثر چرخ با جاده، نیروهای عمودی میان تایر و جاده است که هرچه تغییرات آن‌ها کم‌تر باشد، تماس بیشتری بین جاده و چرخ برقرار است. و چرخ تماس مطلوب‌تری با جاده دارد. قیود سیستم تعلیق که بیان‌گر جابجایی بیشینه

<sup>1</sup> Stability

<sup>2</sup> Handling

<sup>3</sup> Road Holding

مجاز میان محور و بدنه (جابجایی اولیه سیستم تعلیق) و جابجایی میان محور و جاده (جابجایی ثانویه سیستم تعلیق) است، نمایانگر تماس موثر بین چرخ و جاده در خودرو می‌باشد [۱].

جابجایی نسبی میان محور و جاده نشان‌گر اندازه نیروی دینامیکی تایلر است که کاهش آن سبب کاهش تماس موثر چرخ و جاده و در نتیجه کاهش فرمان‌پذیری خودرو می‌شود.

### - درجات آزادی خودرو

دیدگاه عمده در دینامیک خودرو نگرش اجسام صلب است، بنابراین خودرو یک جسم صلب با گستره حرکت فضایی در نظر گرفته می‌شود. بر پایه تعریف درجات آزادی، یک جسم صلب دارای ۶ درجه آزادی می‌باشد که حرکات متناظر با این درجات، حرکات مستقل جسم را تشکیل می‌دهد (شکل ۱-۳). بنابراین

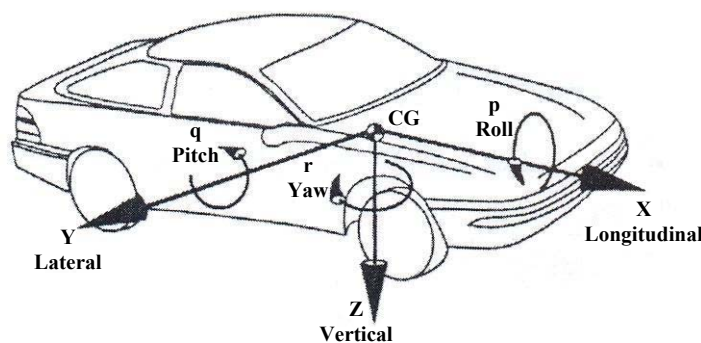
برای نمایش حرکات خودرو درجات آزادی زیر بکار می‌رود [۳]:

حرکت طولی<sup>۱</sup>: حرکت خطی خودرو در راستای طولی

حرکت کناری<sup>۲</sup>: حرکت خطی خودرو در راستای کناری

حرکت عمودی<sup>۳</sup>: حرکت خطی خودرو در راستای عمودی

حرکت غلت‌زنی<sup>۴</sup>: حرکت زاویه‌ای حول محور طولی



شکل ۱-۳ درجات آزادی خودرو

حرکت کله‌زنی<sup>۱</sup>: حرکت زاویه‌ای حول محور کناری بوده و به دو حرکت کله‌زنی رو به جلو<sup>۲</sup> و کله‌زنی

رو به عقب<sup>۳</sup>: که در هنگام ترمزگیری و شتاب‌گیری ایجاد می‌گردد، تقسیم می‌گردد.

<sup>1</sup> Longitudinal

<sup>2</sup> Lateral

<sup>3</sup> Vertical

<sup>4</sup> Roll

حرکت چرخ زنی<sup>۴</sup>: حرکت زاویه ای حول محور عمودی

- جرم فنر بندی شده و جرم فنر بندی نشده

در بررسی گزاف دینامیکی، خودرو متشکل از دو جرم عمده زیر است:

جرم فنر بندی شده یا معلق<sup>۵</sup>: اجزایی از خودرو که به نحوی از سیستم تعلیق خودروی تاثیر می گیرند و

یا به عبارتی بعد از آن قرار دارند، مانند اسکلت خودرو، موتور، سرنشین، صندلی، درب و ...

جرم فنر بندی نشده و یا نامعلق<sup>۶</sup>: بخش‌هایی از خودرو که روی فنرها سوار نیستند و قبل از سیستم

تعلیق قرار دارند، مانند چرخ، محور، پوسته محور، کله‌گای و ....

یک از نکات مهم طراحی دینامیکی خودرو کاهش جرم نامعلق است، زیرا سبب حرکت خشن خودرو

می‌گردد. جرم نامعلق کنترل پذیر نمی باشد زیرا در تماس مستقیم با جاده بوده و از آن پیروی می نماید؛ در

حالی که با طراحی درست سیستم تعلیق می توان حرکات جرم معلق را کنترل نمود. برای نمونه یک چرخ را

در نظر می‌گیریم. اگر چرخ سبک باشد، افت و خیز آن در برابر ناهمواری جاده کنش کمی را به اسکلت

اعمال می‌کند، اما افزایش وزن چرخ سبب افزایش حرکت جرم معلق است. بنابراین در طراحی خودرو تلاش

می شود تا جرم نامعلق درصد کمی از جرم خودرو باشد [۲].

- مرکز غلت و محور غلت

مرکز غلت از ویژگیهای مهم سیستم تعلیق است و نقطه‌ای است که از آنجا نیروی کناری از محور به

جرم معلق منتقل می‌شود. نیز می‌توان چنین در نظر گرفت که مرکز غلت نقطه ای از خودرو است که اعمال

نیروی کناری در آن سبب سرعت غلت زنی نمی‌شود و اگر گشتاور غلتشی به خودرو اعمال شود، خودرو حول

آن می‌گردد. محور غلت نیز خطی است که از مرکز غلت سیستم‌های تعلیق جلو و عقب می‌گذرد.

هر سیستم تعلیق دارای یک مرکز غلت است. این نقطه در صفحه کناری عمود بر زمین که از مراکز

چرخ‌ها می‌گذرد واقع بوده و اعمال نیروی کناری به جرم معلق در این نقطه سبب غلتش تعلیق نمی‌شود. با

<sup>1</sup> Pitch

<sup>2</sup> Forward Pitch

<sup>3</sup> Rearward Pitch

<sup>4</sup> Yaw

<sup>5</sup> Sprung mass

<sup>6</sup> Unsprung mass

توجه به اینکه هر تعلیقی دارای یک محور غلت است، که این محور، محور غلت آنی جرم نامعلق نسبت به جرم معلق بوده و با اعمال گشتاور خالص حرکت غلتش تنها ایجاد می‌شود. مرکز غلت محل تقاطع محور غلت با صفحه کناری گذرنده از مرکز چرخ‌ها می‌باشد. بلندی مرکز غلت عبارتست از فاصله عمودی مرکز غلت از زمین. با شناسایی مرکزهای غلت جلو و پشت و وصل کردن آن‌ها به یکدیگر محور غلت بدست می‌آید. این محور یک محور آنی است که خودرو حول آن نسبت به زمین می‌غلتد.

هنگام غلت خودرو در بیش‌تر سیستم‌های تعلیق، هندسه سیستم تعلیق تغییر می‌نماید، بنابراین محل قرارگیری مراکز غلت نیز تغییر می‌نماید. لذا غلت یک محور آنی است، اما از نظر مفهومی برای مقاصد آنالیز نیروها در صفحه کنار می‌توان آن را ثابت در نظر گرفت [۲].

## ۱-۲ سیستم‌های تعلیق بادی

نیم قرن قبل از اختراع اتومبیل در جهان مهندسان ایده اختراع وسایل نقلیه‌ای که بتوانند بر روی بالشتکی از باد حرکت نمایند را در ذهن می‌پروراندند. با اختراع لاستیک و ساخت فنرهای بادی امید به نزدیک شدن به ساخت چنین وسایلی بیش‌تر شد [۴]. تاریخچه استفاده از فنر بادی در دوچرخه و گاری به بیش از یک قرن و نیم پیش، یعنی سال تولد توماس ادیسون (سال ۱۸۷۴) بر می‌گردد [۴].

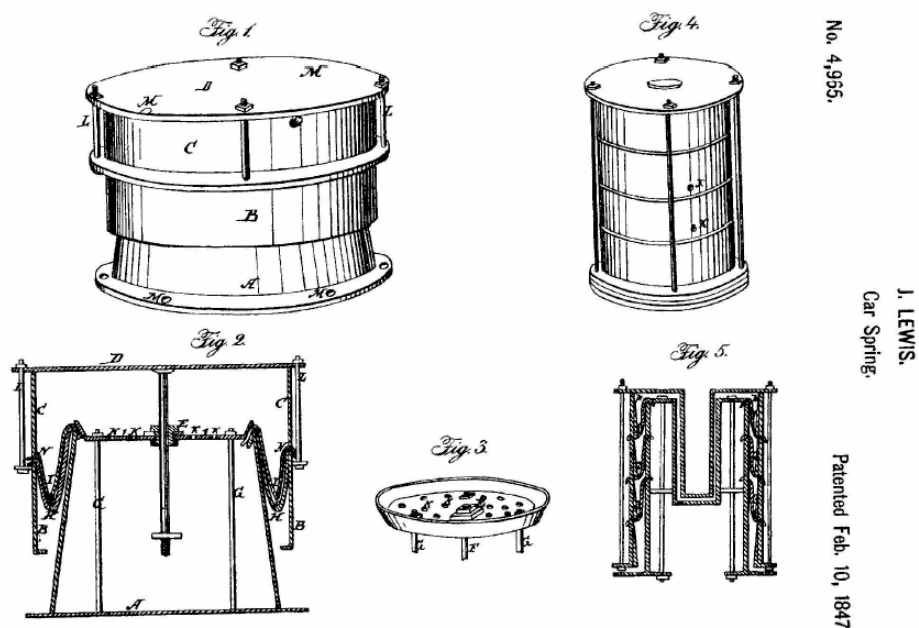
سه سال بعد از اختراع لاستیک توسط چارلز گودیر<sup>۱</sup> در آمریکا آقای جان لوئیس اولین فنر بادی را با استفاده از این لاستیکها، برای استفاده در یک خودروی لوکس اختراع کرد و با شماره 4.965 به ثبت رساند. فنر بادی ساخته شده توسط لوئیس در شکل ۱-۴ آورده شده است. بعد از جنگ جهانی دوم صنعت لاستیک و پلیمر پیشرفت زیادی کرد و فنرهای بادی پلیمری و الاستومری ساخته شد.

اساس عملکرد سیستم تعلیق بادی به طور ساده در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. این سیستم به طور ساده دارای دو زیر سیستم مخزن ذخیره و بالشتک بادی است. همانگونه که در شکل ۱-۵ نشان داده شده وزن خودرو بر روی بالشتک بادی قرار می‌گیرد و فشار هوای داخل بالشتک قابلیت تحمل بار خودرو را فراهم می‌نماید. نوسانات تایر خودرو باعث نوسان فشار و حجم بالشتک بادی می‌گردد. نوسان در ارتفاع و فشار

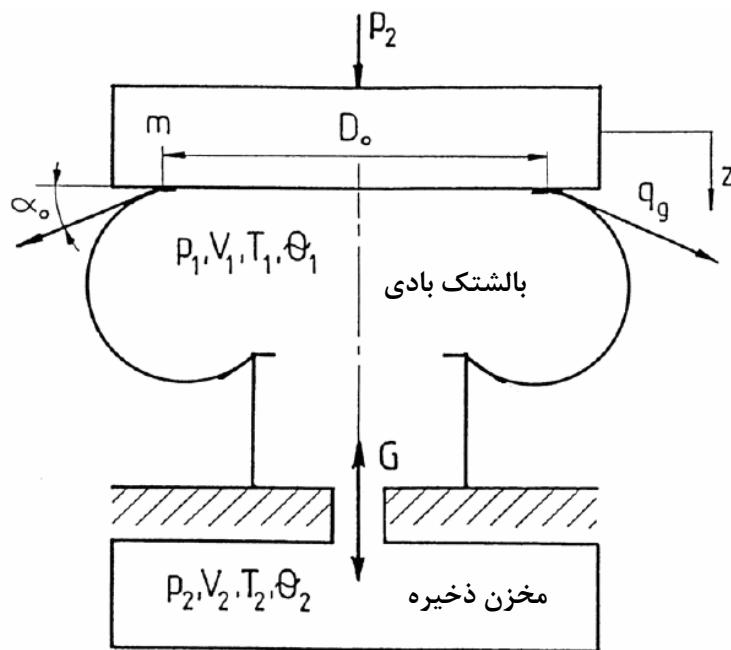
<sup>1</sup> Charls Goodyear

<sup>2</sup> Elastomer

بالشتک باعث حرکت نوسان جرم فنربندی می‌شود، به منظور میرا نمودن این حرکت نوسانی، هوای داخل بالشتک شروع به رفت و برگشت از بالشتک و مخزن ذخیره قرار گرفته شده در زیر بالشتک می‌نماید. هوا در حین عبور بین بالشتک و مخزن ذخیره از درون اوریفیس عبور می‌نماید. فشار نوسانی عبوری هنگام عبور از اوریفیس ثابت می‌شود و حرکت نوسانی وزن فنر بندی شده میرا می‌گردد.



شکل ۱-۴ نمونه اولیه فنر هوایی ساخته شده در سال ۱۸۷۴ میلادی



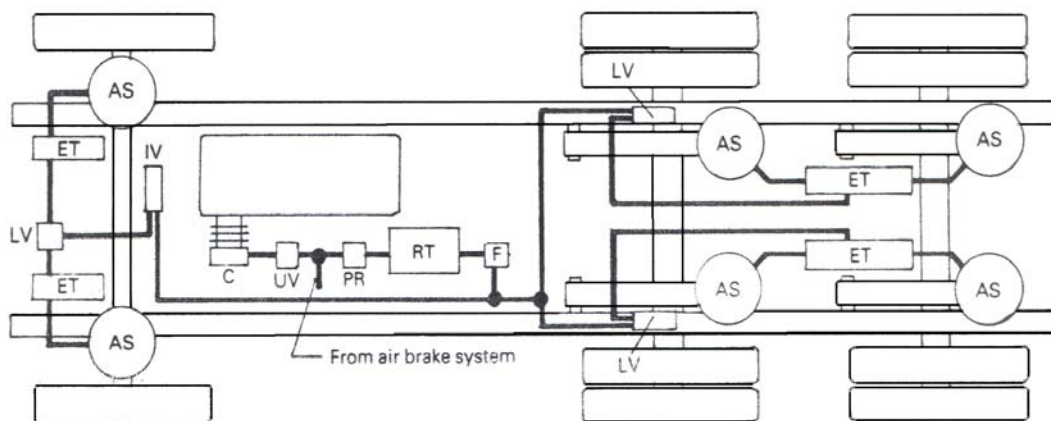
شکل ۱-۵ عملکرد سیستم تعلیق بادی



## ۱-۲-۱ عملکرد سیستم‌های تعلیق بادی

شکل ۶-۱ شاسی یک خودروی سه اکسله را نشان می‌دهد. بر روی هر اکسل یک جفت فنر هوایی نصب گردیده است. فنرهای هوایی در اکسل جلو بر روی اکسل و زیر side member و فنرهای هوایی دو اکسل عقب بین side member و trailing arm نصب شده اند. سیستم تعلیق بادی نشان داده شده در شکل ۶-۱ به طور کلی دارای اجزاء زیر است:

- فنر بادی
- مخزن ذخیره
- شیرها و اتصالات
- کمپرسور



شکل ۶-۱ خط پنماتیکی و اجزاء سیستم تعلیق بادی

کمپرسوری که به موتور متصل است هوای را فشرده می‌نماید هوای فشرده از شیر اطمینان<sup>۱</sup> و کاهنده<sup>۲</sup> فشار عبور کرده و وارد مخزن ذخیره می‌شود. برای تغذیه سیستم ترمز شاخه از مسیر جدا می‌شده، وارد مخزن ذخیره سیستم ترمز ( در شکل ۶-۱ نشان داده نشده) می‌گردد. از آنجا که فشار بالای کمپرسور غیر مشخص (بین ۸ تا ۸,۲۵ بار) است به منظور کاهش مصرف سوخت و جلوگیری از رسیدن صدمه به هر دو سیستم‌های ترمز، تعلیق و همچنین کمپرسور، شیر اطمینان وظیفه دارد در صورت افزایش ناخواسته فشار

<sup>۱</sup> unloader valve

<sup>۲</sup> pressure regulator

کمپرسور خط پنماتیکی را باز نماید تا کمپرسور به صورت خلاص کار کند. با کاهش فشار تا حدود ۷,۲۵ بار (فشار مورد نیاز سیستم ترمز بیش تر از سیستم تعلیق است) شیر اطمینان بسته می شود و هوا به داخل مخازن ذخیره سیستم تزریق می گردد. هوای وارد شده به مخزن ذخیره سیستم تعلیق بعد از گذشتن از کاهنده فشار در حدود ۵,۵ بار فشار دارد [۵].

هوای داخل مخزن ذخیره پس از عبور از یک فیلتر وارد لوله ها و اتصالات مسیر می گردد. به دلیل استفاده از شیرهای پنماتیکی باید هوای وردی به این سیستم ها تصفیه گردد زیرا هرگونه ناخالصی می تواند در مجاری باریک این شیرها ته نشین شود و در عملکرد شیر تاثیر منفی بگذارد.

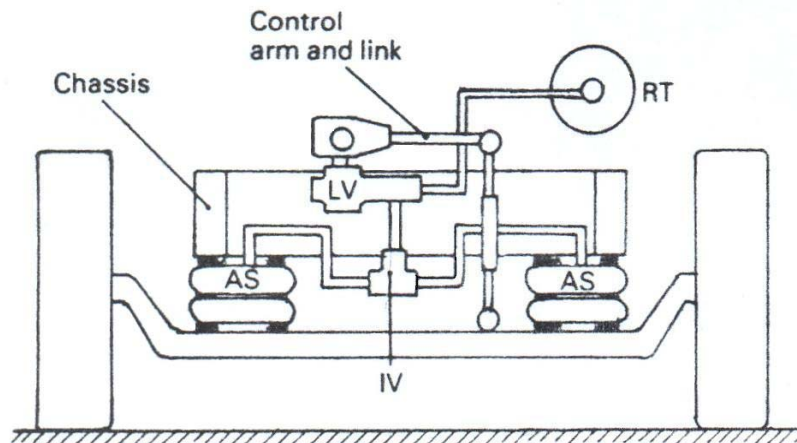
مسیر در ادامه به دو شاخه تقسیم می گردد یک شاخه برای تغذیه فنرهای بادی اکسل جلو و شاخه دیگر به منظور تغذیه فنرهای بادی اکسل ها عقب. در بعضی از سیستم ها ممکن است بر روی هر شاخه به طور مجزا فیلتر نصب شده باشد. هوا پس از عبور از شاخه وارد شیرهای کنترل ارتفاع می گردد.

سیستم تعلیق جلو یک شیر کنترل ارتفاع مرکزی دارد، بازوی کنترل آن بر روی اکسل پیچ شده است. با بالا و یا پایین رفتن شاسی بازوی کنترلی نیز همراه اکسل بالا و پایین می رود. این تغییر مکان به صورت یک ورودی در شیر کنترل ارتفاع عمل می کند، با پایین رفتن بازوی کنترلی شیر کنترل ارتفاع بسته شده و هوا فشرده از فنر بادی به سمت شیر کنترل ارتفاع جریان می یابد و از خروجی شیر تخلیه می شود، تا جایی که ارتفاع خود به ارتفاع اولیه کاهش یابد. و برعکس هنگام بالا رفتن اهرم شیر کنترل ارتفاع باز شده و هوای فشرده از طرف مخزن ذخیره به سمت فنر بادی جریان می یابد تا با بالا بردن فشار فنر بادی ارتفاع فنر را به ارتفاع اولیه برساند.

هنگام پیچیدن خودرو هوا از فنر هوایی خارج پیچ به دلیل بالا رفتن فشار به فنر داخل پیچ منتقل می شود و باعث غلتزنی بیش تر خودرو می گردد برای جلوگیری از این جریان باید یک شیر مجزا کننده<sup>۱</sup> در مسیر نصب گردد تا مانع از انتقال جریان از فنر بادی خارج پیچ به داخل پیچ گردد.

---

<sup>1</sup> Isolator valve



شکل ۱-۷ اتصالات و شیرهای هیدرولیکی در اکسل جلو

آشنایی با ساختمان بعضی از اجزاء سیستم تعلیق بادی می‌تواند درک بهتری از چگونگی عملکرد آنها برای خواننده فراهم نماید به همین دلیلی در زیر به بررسی بیشتر ساختمان بعضی از اجزاء سیستم می‌پردازیم:

- فنر بادی

یک از مهمترین اجزاء سیستم تعلیق بادی فنر بادی است. فنرهای بادی با شکل‌ها و اندازه‌های مختلفی در بازار وجود دارد. بعضی از آنها در سیستم تعلیق خودروهای ویژه استفاده می‌گردند. در شکل ۱-۸ می‌توان این انواع را مشاهده نمود. نام تجاری مربوط به هر کدام برای آشنایی خواننده در جدول ۱-۱ آورده شده است. فنرهای مورد استفاده در سیستم تعلیق به دو نوع کلی دسته بندی (شکل ۱-۹) می‌شوند:

- فنرهای کیسه‌ای<sup>۱</sup>

- فنرهای سیلندری<sup>۲</sup>

معمولا در اتوبوس‌ها و خودروهای جاده‌ای سنگین از فنرهای کیسه‌ای استفاده نمی‌گردد زیرا اولاً عمر خوبی ندارند، گران هستند و معمولاً به منظور تحمل بار زیاد را طراحی نمی‌شوند.

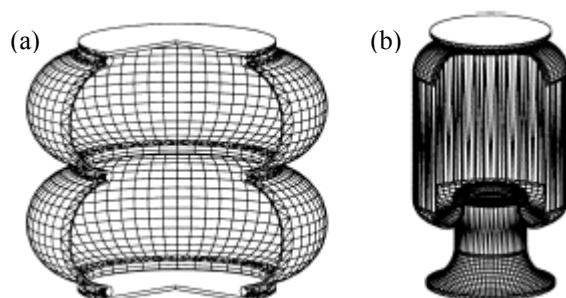
<sup>۱</sup> bellows spring  
<sup>۲</sup> Rolling diaphragm

جدول ۱-۱ انواع فنر بادی موجود در بازار

|   |   |
|---|---|
| 1 | Double convoluted                       |
| 2 | Single convoluted                       |
| 3 | Airstream Argosy                        |
| 4 | Reversible sleeve                       |
| 5 | Tapered sleeve                          |
| 6 | 1973-78 GMC Front Wheel Drive Motorhome |
| 7 | 1973-78 GMC Front Wheel Drive Motorhome |



شکل ۱-۸ اشکال مختلف فنر بادی



شکل ۱-۹ انواع فنر بادی (a) bellow spring, (b) rolling diaphragm

فنر بادی از اجزاء مختلفی تشکیل شده است. ساختار یک فنر بادی کیسه‌ای برای نمونه در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است. این فنر از نوع فنر کیسه‌ای (Double Convoluted) است.