

طراحی و ساخت فنر شمشلی کامپوزیتی

Design and Manufacture of a Composite Leaf Spring

مهرداد کوبی*، مجتبی مشیرنیا

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۴۱۱۵/۱۱۱

دریافت: ۸۲/۱/۲۷، پذیرش: ۸۲/۱۰/۸

چکیده

سالهاسست که برای کاهش وزن خودرو و همچنین کاهش مصرف انرژی، استفاده از فنر شمشلی کامپوزیتی، مرکب از الیاف و رزین با توجه به خواص کامپوزیتهای مطرح بوده است. در این پژوهش، فنر شمشلی کامپوزیتی برای خودروی نیسان پاترول طراحی و ساخته شد. در ابتدا، بهینه‌سازی ابعادی با ثابت در نظر گرفتن تنش خمشی و مساحت سطح مقطع در طول فنر انجام گرفت. سپس، با توجه به ابعاد بدست آمده از طراحی، فنر شمشلی کامپوزیتی با ترکیب مناسبی از الیاف شیشه و رزین اپوکسی به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شد. با مقایسه وزن فنر ساخته شده با نوع فلزی ۷۹/۵ درصد کاهش وزن مشاهده شد. همچنین، نتایج آزمون ایستایی نشان می‌دهد که عملکرد فنر در مقایسه با نوع فلزی قابل رقابت است. با نصب دو نمونه از فنر ساخته شده روی خودروی نیسان پاترول معلوم شد که راحتی مسافر هنگام حرکت خودرو از روی پستی و بلندیهای جاده بهتر از حالت اولیه آن (هنگامی که فنر فلزی قرار داشت) است و ارتفاع خودرو نیز تغییری نمی‌کند.

واژه‌های کلیدی

فنر شمشلی کامپوزیتی،
طراحی ابعادی، لایه‌گذاری دستی،
آزمون ایستایی، رزین اپوکسی

مقدمه

سپس آن را در مدت زمانی طولانیتر و با شدت کمتری پس دهد که فنر شمشلی یکی از این گونه فرهاست. فنرهای شمشلی کامپوزیتی مرکب از مواد پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه جایگزین مناسبی برای فنرهای فلزی شناخته شده است. این گونه فنرها، در خودروهای

فنر جزء اصلی سیستم تعلیق خودروست که به منظور کاهش ضربه‌های وارد بر خودرو، آسایش بهتر مسافران درون آن و بالا رفتن عمر قطعه‌های خودرو بکار برده می‌شود. فنر می‌تواند انرژی را که در اثر شوکهای ناگهانی به خودرو وارد می‌شود جذب و ذخیره کند و

Key Words

composite leaf spring,
dimensional design, hand lay up,
static test, epoxy resin

یکپارچه ساخته می شوند، بنابراین اصطکاک بین لایه ای حذف می شود. با این کار محاسبات فنر بهتر و دقیقتر انجام می گیرد، چون انرژی اصطکاکی فنر فلزی بدقت قابل محاسبه نیست و در شرایط مختلف متفاوت است. حسن دیگر فنرهای یکپارچه این است که حتی انرژیهای کوچک را نیز جذب می کنند، ولی در فنرهای چند لایه انرژیهای کوچک به شکل اصطکاک بین لایه ای از بین می رود و قسمتی از آن به اتاق خودرو منتقل می گردد. همچنین، براساس آزمایشهای انجام گرفته این گونه فنرها مقاومت خوبی در برابر خستگی دارند.

از جمله مزایای فنر کامپوزیتی شکست آرام و قابل شناسایی و ردیابی آنهاست. تخریب آنها مثل فلزات ناگهانی و فاجعه انگیز نیست. فنرهای ساخته شده از کامپوزیتهای پلیمری می توانند در سخت ترین شرایط محیطی مقاومت کنند، دچار خوردگی نمی شوند و در مقابل بنزین، روغن و اسید باتری مقاومت، برخلاف فلزات که برای جلوگیری از پدیده خوردگی در آنها باید با لایه ای از رنگ پوشش داده شوند. عامل مهمی که در ساخت و طراحی قطعه های خودرو باید مدنظر قرار گیرد، قیمت آنهاست. فنرهای کامپوزیتی از لحاظ قیمت نیز در مقایسه با مشابه فلزی مناسبترند [۵، ۶].

برای ساخت فنر کامپوزیتی معمولاً از روشهای لایه گذاری دستی، قالبگیری فشاری، فرایند رشته پیچی و قالبگیری کیسه ای در خلاء استفاده می شود [۷-۱۰]. همچنین، در ساخت این گونه فنرها مانند سایر کامپوزیتهای دو جزء اصلی الیاف و رزین بکار می رود. از خانواده رزینها، اپوکسی، پلی استر و وینیل استر را می توان نام برد که از بین آنها رزین اپوکسی به دلیل خواص برتری همچون سختی و مقاومت ویژه بالا، چسبندگی عالی، مقاومت شیمیایی خوب و میزان جمع شدگی کم پس از بخت، بیشترین مصرف را به خود اختصاص داده است. از بین الیاف شیشه، کربن و گرافیت، الیاف شیشه به دلیل خواص مکانیکی مناسب و قیمت پایین بیشتر مورد توجه بوده است [۱۱، ۱۲].

اساس نظری

طراحی ابعاد هندسی فنر

فنر از لحاظ شکلی به گونه ای باید طراحی شود که تنش خمشی در سرتاسر طول آن در اثر نیروهای اصلی، ثابت باشد (که باعث توزیع انرژی یکنواخت در تمام طول فنر شود). انواع مختلفی از اشکال شیبدار، مانند دوطرف شیبدار (double taper) و یک طرف شیبدار (single taper) برای فنر می توان در نظر گرفت. مطالعات نشان می دهد که از میان تمام اشکال، نوع دو طرف شیبدار با تغییرات ضخامت خطی و تغییرات پهنای هذلولی و مساحت سطح مقطع ثابت در کل طول فنر

سواری، وانتها، کامیونهای سبک و سنگین، تریلرها، هواپیما و خودروهای خورشیدی قابل نصب است.

برنامه توسعه و تولید فنرهای کامپوزیتی در انگلستان به سال ۱۹۶۳ تا ۱۹۶۷ برمی گردد. در طول این دوره تقریباً ۱۵۰ مورد فنرهای شبه بیضوی و دیگر اشکال ساخته شد. این برنامه توسعه برخی مزایای فنر کامپوزیتی از جمله کاهش وزن، عمر زیاد و مصون سازی مطلوب خودرو در برابر ضربه ها را اثبات کرد. با این حال، فنرهای یاد شده در آن زمان بازار مناسبی پیدا نکردند و احتمالاً به دلیل پایین بودن قیمت سوخت استفاده از آنها متوقف گردید. در سال ۱۹۷۷ که اهمیت اقتصادی سوخت افزایش یافت، مجدداً روی کاهش وزن خودرو تاکید شد، در نتیجه استفاده از فنرهای کامپوزیتی مورد توجه ویژه قرار گرفت.

کروت (Corvette) اولین خودرویی است که این جزء کامپوزیتی درون سیستم تعلیق آن در سال ۱۹۸۱ بکار رفت. این فنر به شکل تک لایه به وزن $3/6 \text{ kg}$ جایگزین فنر شمشلی فلزی 10 لایه به وزن 19 kg گردید، در نتیجه حدود ۸۰ درصد کاهش وزن در سیستم ایجاد شد. در سال ۱۹۸۴ طراحی مجدد این فنرها برای خودروی جدیدتر کروت انجام پذیرفت که این فنر در سیستم تعلیق عقب و جلوی این نوع اتومبیل به شکل عرضی قرار گرفت تا بتواند نیروهای عمودی را تحمل کند. در سال ۱۹۸۶ فنرهای کامپوزیتی روی سیستم تعلیق عقب و جلوی ماشینهای تشریفاتی قرار گرفت. استفاده از این فنرها در سال ۱۹۸۸ روی خودروهای سبک جی ام - ۱۰ ادامه یافت. در سال ۱۹۸۹ با اضافه شدن تولید نوعی خودروی جدید جی ام - ۱۰ میزان تولید فنرهای کامپوزیتی از مرز یک میلیون فنر در انگلستان تجاوز کرد. امروزه، این فنرها در سیستم تعلیق خودروهای خورشیدی با هدف به حداقل رساندن وزن مورد استفاده قرار می گیرند [۳-۱]. در ضمن، چندی پیش نیز در پژوهشی فنر شمشلی کامپوزیتی برای خودرویی خاص طراحی و شبیه سازی شده است که نتایج نشان می دهد این گونه فنرها علاوه بر سبکی قابل ملاحظه، نیروی بحرانی بسیار بالاتر از بار طراحی دارند [۴].

همان طور که در آغاز گفته شد فنر شمشلی وظیفه جذب و ذخیره انرژی را بر عهده دارد. پس، میزان انرژی کرنشی ویژه فنر عامل مهمی در کارایی آن به شمار می آید. محاسبات نشان می دهد انرژی کرنشی ویژه کامپوزیتهای از فلزات بیشتر است که این ویژگی یکی از مزایای فنرهای کامپوزیتی است. یکی از معایب فنرهای فلزی، وزن زیاد آنهاست که با کامپوزیتی کردن فنرها، این مشکل رفع می شود. وزن فنرهای کامپوزیتی به میزان ۵۰ تا ۸۰ درصد کمتر از انواع فلزی است. این کاهش وزن اثر بسزایی بر پایین آمدن مصرف سوخت دارد. عیب دیگر فنر فلزی اصطکاک بین لایه ای است. با توجه به اینکه فنرهای کامپوزیتی به شکل

می آید:

$$L_1 = (1 - \eta)L_f \quad (4)$$

جابه جایی (deflection) نیز از معادله زیر بدست می آید:

$$\delta_f = \frac{\partial U}{\partial P_f} = P_f \left\{ \int_{L_1}^{L_f} [(L_f - x)^2 / (E_x(x) I(x)) dx + \int_{L_1}^{L_f} [(L_f - x)^2 / (E_x I_r)] dx \right\} \quad (5)$$

که U انرژی کرنشی، E_x ضریب ارتجاعی مؤثر در هر مقطع و I_r ممان اینرسی در ناحیه سطح مقطع ثابت است. با استفاده از معادلات بالا و با در نظر گرفتن فرض تغییرات پهنای هذلولی و تغییرات ضخامت خطی، سفتی نیز قابل محاسبه است:

$$K_f = \frac{P_f}{\delta_f} = \frac{E_x b_0 t_0^3}{12 L_f^3 (1 - 2\eta/3)} \quad (6)$$

با ترکیب معادله های ۶ و ۱ خواهیم داشت:

$$\sigma_{xx} = \frac{(1/5 E_x^2)^{1/3}}{K_f^{2/3}} \left(\frac{1}{L_f} \right)^{1/3} \left(\frac{1}{\eta^{1/3} (1 - 2\eta/3)^{2/3}} \right) P_f \quad (7)$$

این معادله برای طراحی مهندسی یا ابعادی اولیه بسیار حائز اهمیت است، چون در آن تنش ثابت در طول ناحیه شیبدار بر حسب سفتی، پهنای، طول و نسبت شیب فنر ارائه شده است. از طریق مینیمم کردن سطح تنش خمشی می توان هندسه تیر را بهینه کرد. به عبارت دیگر، سعی می شود ابعاد به گونه ای بدست آید که سطح تنش خمشی کمترین مقدار را داشته باشد. در معادله ۷ به وضوح رؤیت می شود که مقادیر E ، K_f ، L_f ، b_r و P_f همگی ثابت اند و تنها عبارت باقیمانده در فرمول یعنی $[\eta^{1/3} (1 - 2\eta/3)^{2/3}]$ باید مینیمم شود تا سطح تنش خمشی، کمترین مقدار را داشته باشد و در نتیجه هندسه فنر بهینه شود. برای مینیمم کردن عبارت بالا به شکل زیر عمل می شود:

$$\frac{d}{d\eta} \left(\frac{1}{\eta^{1/3} (1 - 2\eta/3)^{2/3}} \right) = 0 \quad (8)$$

که نسبت شیب بهینه معادل ۰/۵ بدست می آید. سفتی کل فنر (K) نیز از معادله زیر حاصل می شود:

$$K = \frac{F_V}{\delta} = \frac{K_f K_r (L_f + L_r)^2}{K_f L_f^2 + K_r L_r^2} \quad (9)$$

(که تضمین کننده پیوستگی الیاف است) مناسبترین انتخاب است. برای ساده تر شدن تحلیل بهتر است فنر شمشی را ترکیبی از دو تیر یک سر گیردار مستقیم در نظر گرفته و نیروهای متمرکز در دو انتهای تیر قرار داده شود.

مطابق شکل ۱ با در نظر گرفتن تنها نیروی متمرکز P_f در انتهای تیر و حذف سایر مؤلفه های دیگر تنش، معادلات اصلی به شکل زیر بدست می آید:

$$\sigma_{xx} = \frac{Mc}{I} = \frac{Mt(x)}{I} = \frac{\sqrt{P_f} (L_f - x)}{b(x)t^2(x)} \quad (1)$$

که L_f طول نیمه جلویی فنر، $b(x)$ توزیع پهنای، $t(x)$ توزیع ضخامت، I ممان اینرسی، M گشتاور وارد شده به فنر و P_f عکس العمل نیروی عمودی در جلوی فنر است.

با فرض ثابت بودن تنش خمشی در طول تیر خواهیم داشت:

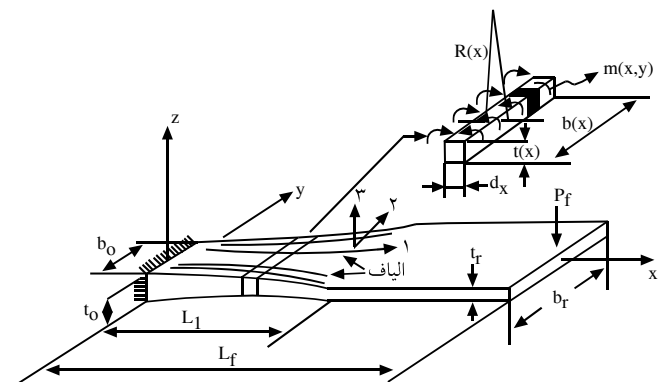
$$\sigma_{xx} \Big|_{x=L_1} = \sigma_{xx} \Big|_{x=0} \Rightarrow \frac{\sqrt{P_f} (L_f - L_1)}{b_r t_r^2} = \frac{\sqrt{P_f} L_f}{b_0 t_0^2} \Rightarrow$$

$$\frac{L_f - L_1}{L_f} = \frac{b_r}{b_0} \left(\frac{t_r}{t_0} \right)^2 \quad (2)$$

که در آن b_r بیشترین پهنای، b_0 کمترین پهنای، t_r کمترین ضخامت، t_0 بیشترین ضخامت و L_1 طول ناحیه شیبدار است. در این معادله متغیر η به شکل زیر تعریف می شود که به آن نسبت شیب گفته می شود:

$$\eta = \frac{t_r}{t_0} = \frac{b_0}{b_r} \quad (3)$$

از ترکیب معادله های ۲ و ۳، طول ناحیه شیبدار (L_1) از معادله ۴ بدست



شکل ۱- مشخصه های نیمه جلویی فنر [۱۳].

جدول ۱- شرایط پخت [۱۴].

پخت اولیه	پخت مجدد
۸ تا ۱۶ h در ۲۵°C	۷ روز در ۲۵°C
۴ تا ۸ h در ۴۰°C	۱۵ h در ۵۰°C
۱ تا ۲ h در ۶۰°C	۲ تا ۱۰ h در ۸۰°C

جدول ۳- مشخصات الیاف شیشه نوع E [۱۴].

مقدار	مشخصه
۲/۵۴-۲/۵۵	چگالی (g/cm ^۳)
۳۵۰۰	استحکام کششی (MPa)
۷۷/۴-۷۶	مدول کششی (GPa)

قطعه‌های با خواص مکانیکی مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد. شرایط پخت و ویژگیهای این رزین بعد از پخت به ترتیب در جدولهای ۱ و ۲ آمده است [۱۴]. همچنین، در ساخت فنر کامپوزیتی در این پژوهش از الیاف شیشه نوع E به دلیل خواص مکانیکی خوب و قیمت کم استفاده می‌شود. مشخصات الیاف شیشه نوع E در جدول ۳ آمده است.

دستگاهها

در این پژوهش، از دستگاه پرس هشتاد تنی ساخت داخل برای تهیه نمونه استاندارد کشش، دستگاه اندازه گیری کشش ژئوتیک آلمان مدل ۱۴۹۴ و دستگاه اندازه گیری ایستایی شرکت فنر سازی زر استفاده شده است.

روشها

برای ساخت نمونه، روش لایه گذاری دستی انتخاب شد. با توجه به این روش و نوع مواد بکار رفته، می‌توان از قالب گچی برای ساخت نمونه استفاده کرد. برای ساخت مدلی که بتوان از آن قالب گچی ساخت به روش زیر عمل شد:

ابتدا مدل چوبی با توجه به ابعاد بدست آمده از طراحی، به کمک شابلون و از کنار هم قرار دادن قطعه‌های چوبی ساخته شد. ولی، به دلیل اینکه مدل چوبی به مرور زمان تغییر ابعاد می‌دهد و در ضمن برای ساخت قالب گچی نمی‌توان از آن استفاده کرد، مدل آلومینیومی (شکل ۲) از روی مدل چوبی ریخته‌گری شد و این مدل برای ساخت قالب گچی مورد



شکل ۲- مدل آلومینیومی.



شکل ۳- فنر شمشلی ساخته شده از کامپوزیت پلیمری.

که در آن K_f و K_r سفتی نیمه جلوبویی و عقبی فنر است که از معادله‌های زیر بدست می‌آید:

$$K_f = \frac{P_f}{\delta_f} = \frac{E_x b_o t_o^3}{12 L_f^3 (1 - 2\eta/3)} \quad (10)$$

$$K_r = \frac{P_r}{\delta_r} = \frac{E_x b_o t_o^3}{12 L_r^3 (1 - 2\eta/3)}$$

اگر معادله‌های بالا را در معادله ۹ قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$K = \frac{E_x b_o t_o^3 (L_f + L_r)}{12 L_f^3 L_r^3 (1 - 2\eta/3)} \quad (11)$$

در معادله بالا مقادیر L_f ، L_r و b_f با توجه به محدودیت‌های نصب روی خودرو ثابت اند، با انتخاب ترکیب مناسبی از t و η که K مورد نظر طراحی را بدست دهد، ابعاد فنر شمشلی کامپوزیتی پلیمری معین می‌شود [۱۳].

تجربی

مواد

برای ساخت فنر کامپوزیتی از رزین اپوکسی (LY ۵۰۵۲) و سخت کننده آمینی (HY ۵۰۵۲) استفاده شده است. این رزین محصول شرکت سیبا یکی از رزینهای اپوکسی با کارایی زیاد است که قابلیت پخت در دمای محیط را دارد و بطور عمده در ساخت قطعه‌های سازه‌ای یعنی

جدول ۲- خواص رزین پخت شده [۱۴].

شرایط پخت	خواص
۷ روز در دمای محیط	استحکام کششی (N/mm ^۲)
	ازدیاد طول در شکست (%)
	ضریب ارتجاعی کششی (N/mm ^۲)
	۴۹-۷۱
	۱/۵-۲/۵
	۳۳۵۰-۳۵۵۰

جدول ۵ - مشخصات فنر کامپوزیتی یکپارچه.

مقدار	علامت اختصاری	مشخصه
۲۸	t_o	بیشترین ضخامت (mm)
۱۴	t_r	کمترین ضخامت (mm)
۶۴	b_r	بیشترین پهنا (mm)
۳۲	b_o	کمترین پهنا (mm)
۱۰۵	δ_f	جابه جایی نیمه جلویی (mm)
۲۲۲	δ_r	جابه جایی نیمه عقبی (mm)
۵/۴۲	W	وزن فنر با چشمی (kg)

قرار داده شده است. نکته مهمی که در جایگزینی فنر کامپوزیتی با فنر فولادی ۸ لایه باید مد نظر قرار گیرد، این است که ابعاد و شکل فنر چه از لحاظ طول و پهنا و چه از لحاظ روش اتصال به خودرو باید طوری طراحی گردد که دقیقاً این فنر بتواند به جای فنر فلزی در زیر خودرو قرار گیرد و نیاز به تغییرات اساسی در محلهای اتصال به شاسی و محور خودرو نباشد. طبق اطلاعات بدست آمده از شرکت پارس خودرو مشخصات فنر فلزی مطابق جدول ۴ است.

علاوه بر نیاز به این ابعاد برای طراحی ابعادی، باید ثابتهای مهندسی کامپوزیت انتخابی (از جمله ضریب ارتجاعی طولی) را نیز داشت. همان طور که گفته شد، برای ساخت فنر کامپوزیتی از رزین اپوکسی LY ۵۰۵۲ و الیاف شیشه نوع E استفاده شده است. درصد الیاف درون کامپوزیت نیز ۶۵ درصد حجمی در نظر گرفته شده است. ضریب ارتجاعی طولی این کامپوزیت با آزمایش کشش نمونه استاندارد مطابق کد ASTM D ۳۰۳۹ برابر ۴۶/۵ GPa بدست آمده است.

به کمک معادلات طراحی و ابعاد فنر فلزی و همچنین خواص کامپوزیت مورد مطالعه مشخصات فنر کامپوزیتی پلیمری بدست می آید.



شکل ۵ - دستگاه آزمون ایستایی.



شکل ۴ - چشمی فنر.

استفاده قرار گرفت.

پس از آماده شدن قالب گچی، الیاف آغشته به رزین به شکل لایه لایه به روش لایه گذاری دستی روی هم قرار داده شد و برای فشرده شدن لایه ها و هواگیری بین آنها در حین ساخت، غلتک کاری انجام شد. با اتمام لایه گذاری، نمونه به مدت یک هفته در دمای ۲۵°C قرار گرفت تا پخت کامل انجام شود. در نهایت، برای بیرون آوردن نمونه (شکل ۳) قالب گچی شکسته شد. چشمیهای فنر (شکل ۴) نیز مطابق اندازه های بوش فنر فلزی تراشیده شد و با جوش دادن به تسمه فلزی، از طریق پیچ و مهره به فنر متصل گردید.

نتایج و بحث

برای ساخت فنر کامپوزیتی، فنر فلزی عقب نیشان پاترول به عنوان مبنا

جدول ۴ - مشخصات فنر فلزی خودروی نیشان پاترول.

مقدار	مشخصه
۱۳۳۰	طول کل فنر (mm)
۵۵۵	طول نیمه جلویی فنر (mm)
۱۴۰	طول ناحیه نشیمنگاه (mm)
۳/۹۵	ضریب فنریت فنر (kg/mm)
۶۳۷۰	بار طراحی (N)
۶۴	بیشترین پهناى مجاز فنر (mm)
۲۶/۵	وزن فنر با چشمی (kg)

جدول ۶- نتایج آزمون ایستایی.

نیروی وارد شده (kg)	تغییر دهانه		میانگین تغییر دهانه (mm)	ΔH (mm)	ضریب فنریت (kg/mm)	میانگین ضریب فنریت (kg/mm)
	رفت (mm)	برگشت (mm)				
۰	۱۲۳	۱۲۳	۱۲۳	۰	۰	۴/۰۷ (در ۴۵۰-۶۵۰ kg)
۱۰۰	۱۰۱	۱۰۲	۱۰۷۵	۲۷۵	۴/۷	
۲۰۰	۷۸	۸۲	۸۰	۲۷۵	۴/۷	
۳۰۰	۵۶	۶۱	۵۸/۵	۲۷۵	۴/۷	
۴۰۰	۳۴	۳۵	۳۴/۵	۲۴	۴/۲	
۵۰۰	۱۰	۱۴	۱۲	۲۲/۵	۴/۴	
۶۰۰	-۱۶	-۱۵	-۱۵/۵	۲۷/۵	۳/۶	
۷۰۰	-۴۱	-۴۲	-۴۷/۵	۲۶	۳/۸	
۸۰۰	-۶۸	-۷۷	-۷۲/۵	۳۱	۳/۲	
۹۰۰	-۹۳	-۹۰	-۹۷/۵	۱۹	۵/۳	

که در جدول ۵ آورده شده است.

برای مقایسه رفتار فنر کامپوزیتی با فنر فلزی، نمونه در شرکت فنر سازی زر تحت بار ایستایی قرار گرفت. در دستگاه آزمون ایستایی نیرو به وسط فنر وارد می شود و هر دو چشمی می تواند آزادانه حرکت کند (شکل ۵).

نتایج مربوط به میزان جابه جایی و همچنین ضریب فنریت برای اعمال نیرو از ۱۰۰ تا ۹۰۰ kg در جدول ۶ آورده شده است. در جدول ۷ نتایج این آزمون با نتایج مربوط به فنر فلزی مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود، همخوانی خوبی بین عملکرد دو فنر تحت بار ایستایی وجود دارد.

فنر کامپوزیتی ساخته شده روی نیشان پاترول دانشگاه نصب شد که با توجه به طراحی دقیق آن، جایگزینی بدون هیچ مشکلی انجام گردید. راحتی مسافر با نصب فنر کامپوزیتی هنگام حرکت خودرو از روی پستی و بلندیها و دست اندازهای جاده در مقایسه با فنر فلزی خیلی بهتر بود و ارتفاع خودرو نیز تغییر چندانی با حالت اولیه خود (هنگامی که فنر فلزی نصب بود) نداشت. پس از باز کردن فنرها از روی خودرو هیچ گونه شکست در قطعه مشاهده نگردید و همچنین، تغییری در میزان قوس فنر ایجاد نشد. شکل ۶ فنر کامپوزیتی نصب شده روی نیشان پاترول دانشگاه تربیت مدرس را نشان می دهد.

نتیجه گیری

ساختار یکپارچه فنر شمشلی کامپوزیتی باعث تر شدن طراحی و

جدول ۷- مقایسه فنر فلزی و کامپوزیتی تحت بار ایستایی.

فنر کامپوزیتی پلیمری	فنر فلزی	نوع آزمایشهای استاندارد
۱۴۱۰	۱۴۲ ± ۳۵	طول تحت بار (mm)
۱۹۶	۱۹۹ ± ۵	دهانه آزاد پس از اعمال نیرو (mm)
۱۰۳/۵	۱۰۰ ± ۵	دهانه در بار ۴۰۰ kg (mm)
۴/۰۷	۱۰۰ ± ۵	ضریب فنریت در بار ۴۵۰-۶۵۰ kg (kg/mm)



شکل ۶- تغییر شکل فنر هنگام قرارگیری یک چرخ خودرو بر روی بلندی.

رزین اپوکسی علاوه بر مزایای متعدد که مهمترین آنها سبکی قابل ملاحظه (۷۹/۵ درصد سبکتر) در مقایسه با نوع فلزی است، طبق آزمایشهای انجام گرفته دارای عملکردی قابل رقابت با فنر فلزی تحت بارهای ایستایی و در شرایط جاده است، از جمله ضریب فنریت فنر کامپوزیتی ساخته شده (۴/۰۷ kg/mm) که مهمترین مشخصه فنر محسوب می شود نزدیک به ضریب فنریت فنر فلزی (۳/۹۵ kg/mm) است.

محاسبات نسبت به فنر تخت فولادی می شود. در فنر تخت فولادی ساختار لایه لایه فنر اصطکاک بین لایه ای در حین بارگذاریهای مختلف، باعث ایجاد گرمای زیاد در فنر می گردد. در طراحی فنر فولادی اصطکاک ایجاد شده باید در نظر گرفته شود و همین اصطکاک موجب پیچیدگی طراحی فنر می شود. در فنر شمشی کامپوزیتی اصطکاک یاد شده وجود ندارد و طراحی ساده تر است. فنر شمشی کامپوزیتی پلیمری ساخته شده از الیاف شیشه و

مراجع

1. Mutzner J.E. and Richard D.S., Development and Testing of Composite Truck Trailer Spring, SAE (Society of Automotive Engineering), Technical Paper 890595, 105-110, 1989.
2. GKN Composite Ltd., Industry News, *Adv. Compos. Bull.*, April 1990.
3. Sancakter E. and Gratton M., Design, Analysis and Optimisation of Composite leaf Spring for Light Vehicle Application, *Compos. Struct.*, **44**, 195-204, 1999.
4. Kokabi M. and Bahramian A.R., Polymeric Composite Leaf Spring, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian ed.)*, **15**, 323-328, 2002.
5. Iran Composites Institute, *Compos. Magaz. (Persian ed.)*, **1**, 13-14, 2001.
6. Rajendran I., Optimal Design of a Composite Leaf Spring Using Genetic Algorithms, *Comput. Struct.*, **79**, 1121-1129, 2001.
7. AL-Qureshi H.A., Automobile Leaf Spring from Composite Materials, *J. Mater. Process. Technol.*, **118**, 58-61, 2001.
8. Richard D.S., Mutzner J.E., Eilerman J.F. and Rau T.E., Method of Forming a Composite Leaf Spring with Fabric Wear Pad, *US Pat.*, 4,894,108, 1990.
9. Jemei Ch., Method of Manufacturing Hybrid Composite Leaf Spring, *US Pat.* 54,25,829, 1995.
10. Woltron H., Process for Producing a Plastic Leaf Spring as Well as a Plastic Leaf Spring Appropriately Manufactured According to this Process, *US Pat.* 4,659,071, 1987.
11. Lawson R.C., Composite Leaf Spring with Improved Lateral Stiffness, *US Pat.* 6,361,032, 2002.
12. Nickel H.W., Bushing Constriction for a Fiber Reinforced Plastic Leaf Spring, *US Pat.* 4,565,356, 1986.
13. Yu W.J. and Kim H.C., Double Tapered FRP Beam for Automotive Suspension Leaf Spring, *Compos. Struct.*, **9**, 279-300, 1988.
14. Beheshti M.H., *Reinforced Plastics (Composites)*, Iran Polymer and Petrochemical Institute, 1378.