

فنر تخت کامپوزیتی پلیمری

Polymeric Composite Leaf Spring

مهرداد کوکی*، احمدرضا بهرامیان

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

دریافت: ۸۰/۹/۲۸، پذیرش: ۸۱/۸/۱۵

چکیده

فنر تخت، بخش اصلی سیستم تعلیق خودروهای سنگین است. وظیفه مهم فنر تخت جذب انرژی به صورت انرژی کرنشی ناشی از نیروهای مختلف وارد شده است. طبق تعریف انرژی کرنشی، موادی که از استحکام کششی زیاد و ضریب انعطاف پذیری کم برخوردارند برای انجام این وظیفه مناسب‌اند. کامپوزیت‌های پلیمری دارای الیاف بلند علاوه بر خواص یاد شده، چگالی کمی دارند و می‌توان از آنها در ساخت فنر تخت استفاده کرد. در این پژوهش، امکان جایگزینی فنر تخت فولادی شش لایه با فنر تخت کامپوزیتی پلیمری با ابعاد هندسی مشابه بررسی شده است. برای این منظور، ابتدا ابعاد هندسی فنر تخت کامپوزیتی پلیمری در مقایسه با فنر تخت فولادی شش لایه محاسبه و سپس رفتار فنر کامپوزیتی با استفاده از نرم افزار ANSYS مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که فنر تخت کامپوزیتی طراحی شده نه تنها می‌تواند بخواهی وظیفه مورد نظر فنر تخت فولادی را انجام دهد، بلکه وزن فنر تخت به میزان ۷۹ درصد کاهش می‌یابد. در ضمن، نیروی عمودی بحرانی برای فنر تخت کامپوزیتی پلیمری معادل ۲۶۴۳۶ نیوتن و توزیع تنش آن نسبت به نوع فولادی یکنواخت تر است.

(مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال پانزدهم، شماره ۵، صفحه ۲۲۸-۲۳۲، ۱۳۸۱)

واژه‌های کلیدی

فنر تخت، کامپوزیت پلیمری، روش اجزای محدود، رزین اپوکسی، الیاف شیشه

مقدمه

نوارهای فولادی روی یکدیگر تشکیل می‌شود، به صورتی که هر لایه از لایه زیرین خود بلندتر است. در نتیجه، ضخامت فنر در وسط زیاد و در دو انتها کم می‌شود، از این رو تحت بارهای خمشی، تنش تقریباً یکسانی در طول فنر ایجاد می‌شود [۱].

فنرها از اجزای اصلی سیستم تعلیق در خودروها هستند که استفاده از آنها برای کاهش ضربه ناشی از دست اندازها و تصادفات و ایجاد حرکتی راحت ضروری است. فنر تخت بخش اصلی، قابل اطمینان و قدیمی در سیستم تعلیق خودروها بشمار می‌رود. فنر تخت با چیدن

key words

leaf spring, polymeric composite, finite elements method, epoxy resin, glass fibers

مزیت بزرگی برای کامپوزیتهای پلیمری محسوب می شود، زیرا با کاهش مساحت سطح مقطع در طول فنر، ناگزیر به استفاده از الیاف به صورتی ناپیوسته هستیم که این موضوع باعث تغییر نسبت حجمی الیاف در طول فنر و در نتیجه بروز خواص ناهمگن در طول فنر می شود که در نهایت منجر به کاهش میزان انرژی ذخیره شده در آن می گردد. بدین ترتیب، بازده بالا همراه با سطح پایینی از تنشهای برشی، مهمترین مزیت های شکل انتخاب شده در طراحی فنر تخت کامپوزیتی پلیمری است [۶].

طراحی ابعاد هندسی فنر تخت کامپوزیتی پلیمری

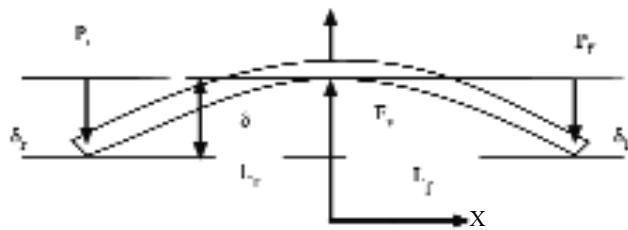
فنر تخت کامپوزیتی پلیمری را می توان به صورت دو تیر یک سر گیردار (cantilever) مستقیم فرض کرد [۶]. با این فرض مسئله به صورت تیر کامپوزیتی یک سر گیردار و دو طرف شیبدار مستقیم درمی آید که الیاف به صورت یکنواخت در طول تیر قرار می گیرد و نیروها به طور متمرکز در انتهای تیر اعمال می شود. با توجه به شکل ۱ و با فرض ثابت بودن تنش خمشی (σ_{xx}) ، معادله زیر به منظور محاسبه σ_{xx} بدست می آید:

$$\sigma_{xx} = \frac{Mt(x)}{2I(x)} = \frac{6P_f(L_f - x)}{b(x)t^2(x)} \quad (1)$$

اندیس f نشان دهنده نیمه جلویی فنر است. البته، ممکن است در موارد خاصی نیمه جلو و عقب فنر یکسان نباشد. b و t به ترتیب عرض و ضخامت فنر است، M گشتاور وارد شده به فنر و I گشتاور دوم سطح، P_f عکس العمل نیروی عمودی در جلوی فنر و L_f طول نیمه جلویی فنر است.

پارامترهای آمده در شکل ۱ عبارتند از: F_V نیروی عمودی، P_f و P_r عکس العمل F_V به ترتیب در عقب و جلوی فنر، δ_r و δ_f تغییر مکان عمودی به ترتیب در عقب و جلوی فنر و L_r و L_f طول نیمه جلو و عقب فنر.

برای محاسبه طول ناحیه شیبدار از فرض ثابت بودن تنش خمشی در مقاطع طولی قسمت شیبدار استفاده می شود.



شکل ۱- پارامترهای طراحی فنر تخت [۶].

شرکت جنرال موتور (GM) در اوایل دهه ۱۹۶۰ اقدام به جایگزین کردن فنرهای تخت فلزی با فنرهای تخت سبکتر ساخته شده از مواد کامپوزیتی پلیمری کرد، اما با توجه به قیمت پایین سوخت در آن زمان استقبال چندانی از این طرح نشد و جنرال موتور مجبور به متوقف کردن آن گردید. در قرن حاضر با عنایت به ضرورت سبک سازی هر چه بیشتر خودروها با هدف کاهش سوخت و صرفه جویی در منابع انرژی، طراحی و ساخت این نوع فنرها در دستور کار قرار گرفته است [۲،۳]. فنر کامپوزیتی پلیمری برخلاف فنرهای معمول فلزی به شکل کاملاً یکپارچه اند و از رزین پلیمری تقویت شده با الیاف بلند با استفاده از روشهای رشته پیچی و قالبگیری فشاری ساخته می شوند [۴].

اساس نظری

فنر تخت کامپوزیتی پلیمری

مهمترین مزایای انتخاب کامپوزیتها در ساخت فنرهای تخت به شرح زیر است:

الف- کامپوزیت تک جهتی در جهت طولی از استحکام زیادی برخوردار است. در فنر تخت نیز اکثر تنشها، تنشهای طولی کششی و فشاری هستند.

ب- فنرهای تخت کامپوزیتی نسبت به نوع فولادی بسیار سبکتر بوده و وزن آنها ۵۰ تا ۸۰ درصد نوع فولادی است.

ج- فنرهای تخت کامپوزیتی نسبت به نوع فولادی، عمر خستگی طولانی تری نشان می دهند.

د- مواد کامپوزیتی در دمای محیط رفتار ویسکوالاستیک نشان می دهند. این رفتار باعث می شود که فنر توان میرایی بارهای نوسانی را داشته باشد.

ه- عموماً فنرهای تخت کامپوزیتی به صورت یکپارچه طراحی و ساخته می شوند، بنابراین اصطکاک بین لایه ای حذف می شود و در نتیجه، محاسبات انرژی اصطکاکی فنر در شرایط مختلف بهتر و دقیق تر انجام می گیرد.

و- فنرهای تخت کامپوزیتی قابلیت جذب انرژیهای کوچک اعمال شده را نیز دارند [۵].

برای دستیابی به توزیع یکنواخت انرژی در طول فنر، طراحی باید به گونه ای انجام شود که تنش خمشی در کل طول فنر در اثر اعمال نیروهای عمودی ثابت باشد [۶]. در بین طراحیهای پیشنهاد شده، نوع دو طرف شیبدار (double tapered) با تغییرات خطی در ضخامت و هذلولی در پهنا و مساحت سطح مقطع ثابت در کل طول فنر، شرط یاد شده را برآورده می کند. ثابت بودن مساحت سطح مقطع تضمینی بر پیوستگی الیاف و عدم انقطاع آنها در راستای طول فنر است. این مسئله

$$b(x) = \frac{b_0}{1 - [(1 - \eta) / L_1] x} \quad (10)$$

با ترکیب معادله‌های (۸)، (۹) و (۱۰) سفتی فنر به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$K_f = \frac{E^*(x) b_0 t_0^3}{12 L_f^3 (1 - 2\eta/3)} \quad (11)$$

و با ترکیب معادله‌های (۱) و (۱۱) داریم:

$$\sigma_{xx} = \frac{(3/2 E^*(x))^{1/3} \left(\frac{P_f}{L_f b_f^{1/3}} \right) \frac{1}{\eta^{1/3} (1 - 2\eta/3)^{2/3}}}{K_f^{2/3}} \quad (12)$$

که در آن σ_{xx} تنش ثابت در ناحیه شیبدار است. برای بدست آوردن شکل هندسی بهینه فنر باید سطح تنش خمشی σ_{xx} کمترین مقدار باشد. برای محاسبه مقدار مینیمم، مشتق عبارت مذکور را برابر صفر قرار می‌دهیم [۷]:

$$\frac{d}{d\eta} \left(\frac{1}{\eta^{1/3} (1 - 2\eta/3)^{2/3}} \right) = 0 \quad (13)$$

که نسبت شیب بهینه معادل ۰/۵ بدست می‌آید.

جایگزینی فنر تخت فولادی نمونه با فنر تخت کامپوزیتی پلیمری

برای مقایسه بهتر تفاوت‌های فنرهای تخت فولادی و کامپوزیتی، با استفاده از اطلاعات و محدودیت‌های طراحی فنر تخت شش لایه فولادی (جدول ۱)، فنر تخت کامپوزیتی پلیمری طراحی شد.

سپس، فنر تخت کامپوزیتی پلیمری جایگزین فنر تخت فولادی شش لایه شد. نکته‌ای که در این جایگزینی باید مورد توجه قرار گیرد این است که جایگزینی باید به صورت یک به یک و کامل صورت گیرد و از هر لحاظ، چه از نظر طول که برای نصب روی خودرو اهمیت دارد و چه از نظر پهنا و همچنین روش اتصال به شاسی، فنر تخت کامپوزیتی پلیمری باید قابلیت جایگزینی فنر تخت فولادی را داشته باشد. بنابراین، طراحی ابعاد فنر کامپوزیتی پلیمری باید با در نظر گرفتن محدودیت‌های طول و پهنا و همچنین روش نصب روی خودرو صورت گیرد.

برای بررسی رفتار فنر تخت کامپوزیتی پلیمری، میزان بار بحرانی و تغییر مکان‌های ایجاد شده تحت تأثیر تنش‌های مختلف در فنر مذکور با استفاده از روش اجزای محدود مطالعه و محاسبه شد. در این طراحی برای مدل‌سازی از جزء ۹۵ SOLID استفاده شد. این جزء دارای سه

$$\sigma_{xx} \Big|_{x=L_1} = \sigma_{xx} \Big|_{x=0} \rightarrow \frac{6P_f(L_f - L_1)}{b_f t_f^2} = \frac{6P_f L_f}{b_0 t_0^2} \quad (2)$$

$$\frac{L_f - L_1}{L_f} = \frac{b_f}{b_0} \times \frac{t_f^2}{t_0^2} \quad (3)$$

در معادلات بالا L_1 طول ناحیه شیبدار و b_f و t_f به ترتیب عرض و ضخامت انتهای فنر است. همچنین b_0 و t_0 به ترتیب عرض و ضخامت وسط فنر (مبدأ مختصات) است و پارامتر $\frac{t_f}{t_0}$ نسبت شیب (η) نامیده می‌شود.

$$\eta = \frac{t_f}{t_0} = \frac{b_0}{b_f} \quad (4)$$

با ترکیب معادله‌های (۳) و (۴) داریم:

$$L_1 = (1 - \eta)L_f \quad (5)$$

در انتهای فنر و محل اعمال نیروی متمرکز P_f ، جابه‌جایی (deflection) فنر با استفاده از معادله زیر بدست می‌آید:

$$\delta_f = \frac{\partial U}{\partial P_f} \quad (6)$$

در این معادله U انرژی کرنشی فنر است که به صورت زیر بدست می‌آید:

$$U = \int_0^{L_f} \frac{M^2}{2E^*(x)I} dx \quad (7)$$

که در آن $E^*(x)$ ضریب ارتجاعی مؤثر گسیختگی در هر مقطع است. سفتی فنر نیز با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$K_f = \frac{P_f}{\delta_f} = \quad (8)$$

$$\frac{P_f}{\left\{ \int_0^{L_1} [(L_f - x)^2 / (E^*(x)I(x))] dx + \int_{L_1}^{L_f} [(L_f - x)^2 / (E^*(x)I(x))] dx \right\}}$$

برای بدست آوردن ابعاد بهینه فنر، دو شرط تنش ثابت در قسمت شیبدار (معادله ۵) و مساحت سطح مقطع ثابت در طول فنر در نظر گرفته می‌شود. با اعمال این دو فرض معادلات زیر برای توزیع ضخامت و عرض فنر بدست می‌آید:

$$t(x) = t_0 - \frac{t_0 - t_f}{L_1} x = t_0 \left[1 - \frac{1 - \eta}{L_1} x \right] \quad (9)$$

جدول ۱- مشخصات فنر تخت فولادی شش لایه نمونه [۷].

مقدار	علامت اختصاری	مشخصه
۶۴	w	عرض (mm)
۱۳۲۰	L	طول بین مراکز چشمبها (mm)
۲۲۰۰	P ₁	کمترین بار طراحی (N)
۶۰۰۰	P ₂	بیشترین بار طراحی (N)
۲۵	K ₁	سفتی فنر در کمترین بار طراحی (N/mm)
۴۳	K ₂	سفتی فنر در بیشترین بار طراحی (N/mm)
۸۰	-	طول غیر فعال فنر (mm)
۱۳	W	وزن فنر (kg)

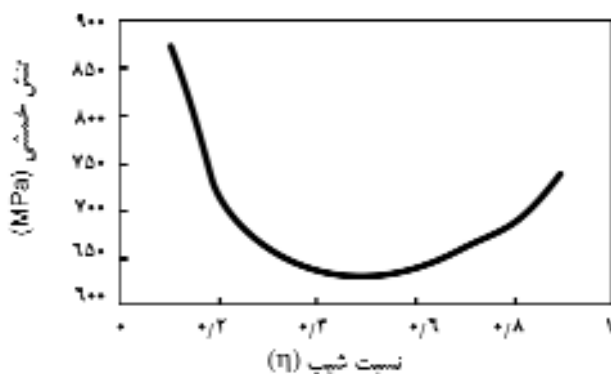
جدول ۳- مشخصات محاسبه شده فنر تخت کامپوزیتی پلیمری.

مقدار	علامت اختصاری	مشخصه
۳۰	t _o	بیشترین ضخامت (mm)
۱۵	t _f	کمترین ضخامت (mm)
۶۴	b _f	بیشترین پهنا (mm)
۳۲	b _o	کمترین پهنا (mm)
۳۱۰	L/۴	طول با عرض ثابت فنر (mm)
۱۰۶	δ	جابه جایی آزاد فنر (mm)
۲۳/۱۱	K _f	سفتی نیمه جلو (N/mm)
۲۳/۱۱	K _r	سفتی نیمه عقب (N/mm)
۶۳۶	σ _{xx}	بیشترین تنش خمشی ناشی از بار طراحی (MPa)
۲/۷	W	وزن فنر (kg)

فنر فولادی شش لایه معرفی شده در جدول ۱ با فنر کامپوزیتی پلیمری جایگزین شد. برای این منظور طول فنر، بیشترین عرض فنر و سفتی آن در اعمال بار طراحی به عنوان محدود دیتهای طراحی انتخاب شدند.

با استفاده از معادله (۱۲)، منحنی تغییرات σ_{xx} بر حسب η در شکل ۲ ارائه شده است. این نمودار نیز کمترین مقدار σ_{xx} را در η معادل ۰/۵ نشان می دهد. از آنجا که یکی از اهداف ما در طراحی فنر تخت کامپوزیتی پلیمری دستیابی به کمترین مقدار سطح تنش خمشی (σ_{xx}) است، در تمام معادله های طراحی، مقدار η معادل ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

با در نظر گرفتن نسبت شیب مناسب و فرض مساحت سطح مقطع ثابت، توزیع ضخامت و عرض فنر کامپوزیتی در شکلهای ۳ و ۴ نشان

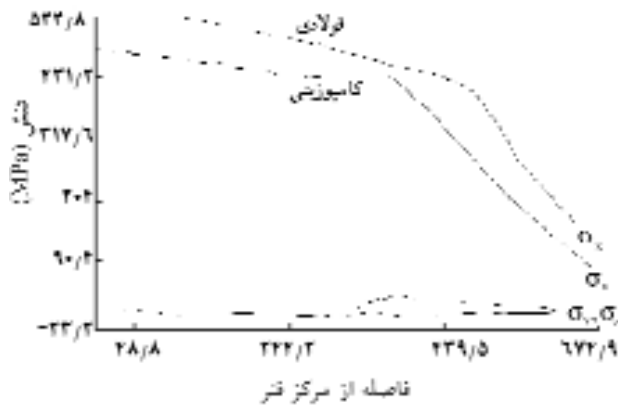
شکل ۲- منحنی تغییرات σ_{xx} بر حسب نسبت شیب (η).

درجه آزادی است و تا صد لایه می توان در آن تعریف کرد. ثابتهای مهندسی و خواص مکانیکی مواد تشکیل دهنده کامپوزیت رزین اپوکسی و الیاف شیشه، که در تحلیل فنر تخت کامپوزیتی پلیمری مورد استفاده قرار گرفته اند، در جدول ۲ درج شده است.

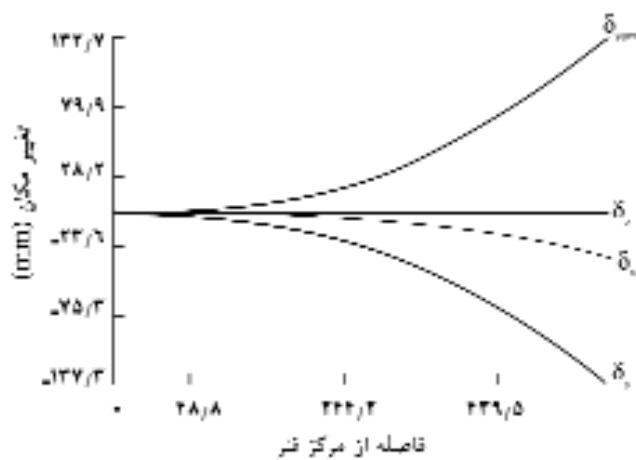
نتایج و بحث

با استفاده از معادله ها و فرمولهای طراحی فنر تخت کامپوزیتی پلیمری، جدول ۲- خواص مواد مورد استفاده در تحلیل فنر تخت کامپوزیتی پلیمری [۸].

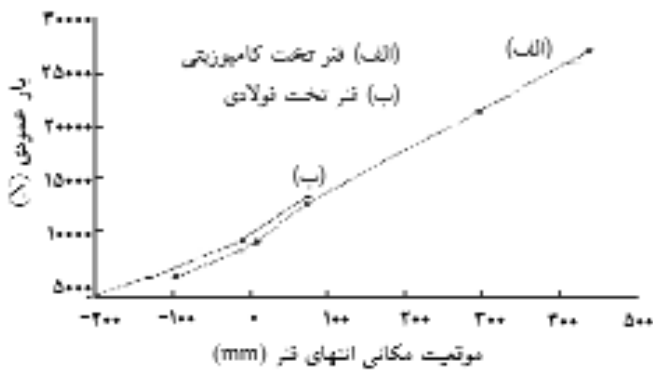
مقدار	مشخصه	خصوصیات
۶۰	V _f	نسبت حجمی الیاف (%)
۵۱	E _x	ضریب ارتجاعی طولی (GPa)
۱۱/۲	E _y	ضریب ارتجاعی عرضی (GPa)
۰/۳۱	v _{xy}	ضریب پواسون طولی
۰/۱۴	v _{yx}	ضریب پواسون عرضی
۱/۱۰۳	X	استحکام کششی طولی (GPa)
۰/۰۲۷۶	Y	استحکام کششی عرضی (GPa)
۰/۰۸۲۷	S	استحکام برشی (GPa)



شکل ۶- توزیع تنش روی سطح فنر تخت کامپوزیتی پلیمری و فولادی.

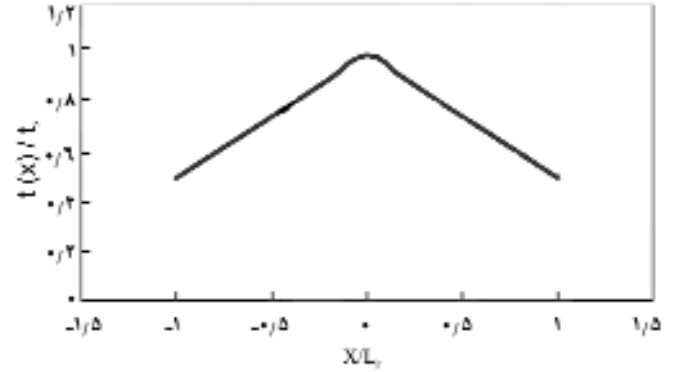


شکل ۷- نمودار تغییر مکان فنر تخت کامپوزیتی پلیمری در اثر اعمال بار طراحی.

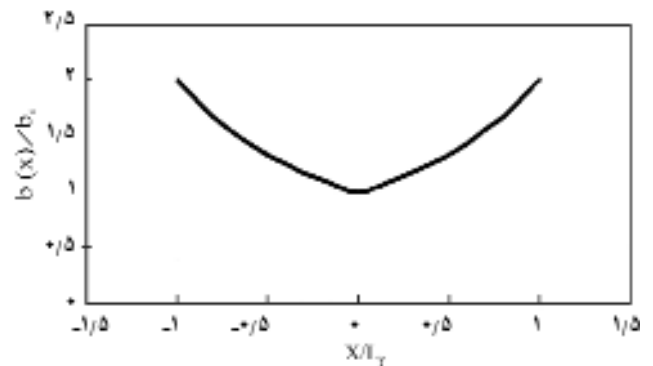


شکل ۸- نمودار بار- تغییر مکان: (الف) فنر تخت کامپوزیتی پلیمری و (ب) فنر تخت فولادی.

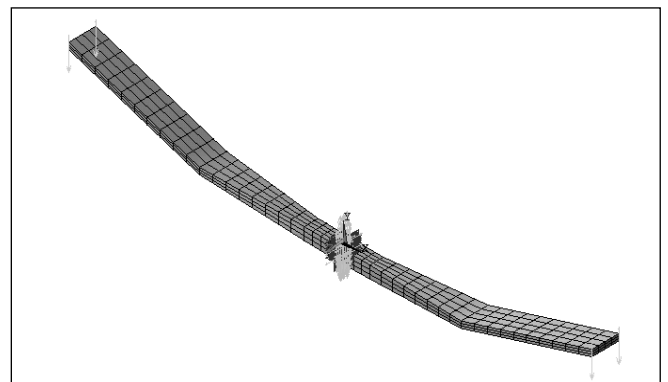
دید می شود، توزیع تنش σ_x روی سطح فنر تخت کامپوزیتی پلیمری و فولادی شبیه به هم است، با این تفاوت که سطح تنش در فنر کامپوزیتی پلیمری پایینتر است و این به دلیل توزیع یکنواخت تر تنش در طول فنر تخت کامپوزیتی پلیمری است [۹].



شکل ۳- توزیع ضخامت فنر تخت کامپوزیتی.



شکل ۴- توزیع عرض فنر تخت کامپوزیتی.



شکل ۵- نمایی از فنر تخت کامپوزیتی طراحی شده.

داده شده است.

نتایج طراحی و محاسبات انجام شده بر مبنای محدودیتها و اطلاعات جدول ۱ و معادله های ارائه شده در جدول ۳ ارائه شده است. در شکل ۵ نمای سه بعدی فنر تخت کامپوزیتی پلیمری طراحی شده نشان داده شده است.

در شکل ۶ نمایی از توزیع تنش در جهت X روی سطح فنر تخت کامپوزیتی پلیمری و فولادی ارائه شده است. همان طور که در این شکل

شده، انتهای فنر کامپوزیتی حدود ۱۰ میلی متر پایینتر قرار می گیرد که این اختلاف برای بار ۱۰۰۰۰ نیوتن به ۵ میلی متر کاهش یافته است. ضروری است به این اختلاف در طراحی و بکار گیری فنر تخت کامپوزیتی پلیمری در شرایط عملی توجه شود.

نتیجه گیری

از آنجا که امروزه جهان با بحران انرژی و ضرورت صرفه جویی هر چه بیشتر در مصرف انرژی روبه روست، پرداختن به سبک سازی خودرو، از جمله جایگزینی فنر تخت فولادی با فنر تخت کامپوزیتی پلیمری، ضروری بنظر می رسد. چون فنرهای تخت کامپوزیتی پلیمری به شکل یکپارچه طراحی و ساخته می شوند، طراحی فنر ساده تر است و بررسی و مطالعه رفتار فنر تخت تحت تأثیر بارهای مختلف راحت تر و دقیقتر انجام می شود.

فنرهای تخت کامپوزیتی پلیمری نسبت به نوع فولادی بسیار سبکترند. بطور نمونه در طرح حاضر با جایگزینی فنر تخت فولادی با فنر کامپوزیتی پلیمری، وزن فنر از ۱۳ kg به ۲/۷ kg (معادل ۷۹ درصد) کاهش می یابد که بسیار قابل توجه است و می تواند یکی از مهمترین انگیزه های جایگزینی فنر فولادی با نوع کامپوزیتی باشد. از آنجا که فنر تخت کامپوزیتی ساختاری یکپارچه دارد، توزیع تنش در این نوع فنر نسبت به نوع فولادی یکنواخت تر است.

تحلیلهای انجام شده روی فنر تخت کامپوزیتی طراحی شده در این پژوهش نشان می دهد که نیروی عمودی بحرانی برای این فنر معادل ۲۶۴۳۶ نیوتن است که بسیار فراتر از بار طراحی یعنی ۶۰۰۰ نیوتن است. موقعیت مکانی انتهای فنر تخت کامپوزیتی پلیمری در بار طراحی ۶۰۰۰ نیوتن ۱۰ میلی متر پایینتر از نوع فولادی قرار می گیرد که باید به این اختلاف در طراحی و بکار گیری در شرایط عملی توجه داشت.

همچنین، در این شکل توزیع تنشها در جهات تنشهای $(\delta_y)y$ و $(\delta_z)z$ روی سطح فنر تخت کامپوزیتی پلیمری نشان داده شده است که تقریباً برهم منطبق هستند. شکل ۷ تغییر مکان فنر در جهتهای طول $(\delta_x)x$ ، عرض $(\delta_y)y$ و ارتفاع $(\delta_z)z$ و برآیند تغییر مکانها (δ_{sum}) را در طول فنر تخت کامپوزیتی پلیمری برای بار طراحی ۶۰۰۰N در دمای محیط نشان می دهد. در این نمودار تغییر مکان انتهای فنر در جهت اعمال بار (جهت y) معادل ۱۳۷/۳ میلی متر است. تغییر مکان انتهای فنر در جهت محور فنر (جهت x) به دلیل کاهش انحنای فنر در اثر اعمال بار طراحی معادل ۲۵ میلی متر است (از آنجا که فنر مورد نظر متقارن است، نمودارهای مذکور برای نیمه عقبی فنر نیز صادق است).

در شکل ۸ نمودار موقعیت مکانی انتهای فنر تخت کامپوزیتی پلیمری (الف) در مقایسه با تغییرات موقعیت مکانی انتهای فنر تخت فولادی (ب) برحسب بار عمودی رسم شده است. نمودار مربوط به فنر تخت فولادی بر اساس اطلاعات تجربی و آزمایشهای انجام شده روی فنر یادشده از مرجع انتخاب فنر استخراج شده است [۷]. در این نمودار نیز جهت مثبت تغییر مکان به سمت پایین و محور مختصات در مرکز فنر در نظر گرفته شده است (همانند شکل ۵). در شکل ۸ موقعیت مکانی انتهای فنر در حالت اعمال بار بحرانی ۶۰۰۰ نیوتن، صفر در نظر گرفته شده که نقاط بالای آن منفی و نقاط پایین آن مثبت است. در این شکل نمودار مربوط به فنر تخت کامپوزیتی پلیمری از بار ۲۲۰۰ تا ۲۶۴۳۶ نیوتن محاسبه و رسم شده است. اما از آنجا که اطلاعات تجربی مربوط به فنر تخت فولادی تا بار ۱۰۳۰۰ نیوتن گزارش شده است، مقایسه دو منحنی مذکور تنها در محدوده بارهای ۲۲۰۰ تا ۶۰۰۰ نیوتن امکان پذیر است. همان طور که مشاهده می شود، سرعت تغییرات منحنیهای یادشده شبیه به هم است، با این تفاوت که نمودار بار - تغییر مکان فنر تخت کامپوزیتی پلیمری کمی پایینتر از نمودار فنر تخت فولادی قرار گرفته است. در بار ۶۰۰۰ نیوتن که موقعیت مکانی انتهای فنر فولادی صفر در نظر گرفته

مراجع

1. Meatto F. and Pilpel E., "Hybrid Leaf Spring and Suspension System for Supporting an Axle on a Vehicle", *US Pat. 6,012,709*; 2000.
2. Muzio C., "Leaf Spring for a Suspension of a Vehicle", *US Pat. 6,056,572*; 2000.
- ۳- مؤسسه کامپوزیت ایران، مجله کامپوزیت، شماره اول، صفحه ۱۳-۱۴، بهار ۱۳۸۰.
4. Kofler W., "Leaf Spring of Composite Fiber Plastics Material", *US Pat. 4,786,033*; 1988.
5. Chang J., "Hybrid Composite Leaf Spring", *US Pat. 5,667,206*; 1992.
6. Yu W.J. and Kim H.C., "Double Tapered FRP Beam for Automotive Suspension Leaf Spring", *Compos. Struct.*; **9**, 279-300, 1988.
7. *Spring Design Manual*; Prepared under the Auspices of the SAE Spring Committee, 2nd ed., AE-12, 1996.
8. Stephan F., Fit A. and Dutcurtre X., "In-Process Control of Epoxy Composite by Microdielectrometric Analysis", *Polym. Eng. Sci.*; **37**, 2,436-449, 1997.
9. Sancaktar E. and Gratton M., "Design, Analysis and Optimization of Composite Leaf Spring for Light Vehicle Application", *Compos. Struct.*; **44**, 195-204, 1999.