

نفربرهای نظامی مدرن چرخ‌دار بررسی سیستم فرمان در دو محور

علی صفائی، کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، مرکز تحقیقات خودرو، سوخت و محیط زیست، دانشگاه تهران

ali.safaie@ut.ac.ir

چکیده

بررسی سیستم انتقال قدرت نفربرهای نظامی شش و هشت‌چرخ، با بررسی سیستم فرمان آنها عجین است. این امر به فرمان‌پذیری این خودروها در دو محور مربوط می‌شود. به عبارت دیگر، در نفربرهای نظامی شش و هشت‌چرخ، دو محور محرک فرمان‌پذیر وجود دارد. در این مقاله، سیستم فرمان روی دو محور برای نفربرهای نظامی شش و هشت‌چرخ بررسی و روش طراحی آن بیان شده است. در این رهگذر، ابتدا روند طراحی سیستم فرمان برای خودروهای چهارچرخ بیان می‌شود. سپس روند ذکرشده به خودروهای شش و هشت‌چرخ بسط داده می‌شود. در پایان، به محورهای محرک فرمان‌پذیر و سیستم‌های فرمان قدرت، که در انواع خودروها استفاده می‌شوند، اشاره می‌شود.

واژگان کلیدی: خودرو، نفربر نظامی، سیستم فرمان

مقدمه

وسائل نقلیه زمینی در کنار وسائل نقلیه هوایی و دریایی، ادوات اصلی کشورها در عملیات نظامی و جنگ‌ها محسوب می‌شوند. تا سال‌های پایانی جنگ سرد، خودروهای نظامی به دو دسته تقسیم می‌شدند:

۱. خودروهای چرخ‌دار که معمولاً مسلح نبودند و تنها برای جابه‌جایی افراد و تجهیزات استفاده می‌شدند.
 ۲. خودروهای دارای شنی (تانک‌ها) که مسلح بودند و برای حمله به دشمن به کار می‌رفتند.
- تانک‌ها، به دلیل نداشتن چرخ، سرعت و شتاب پایینی دارند که این خود سبب کاهش چابکی آنها می‌شود. از این‌رو، در

اواخر دهه ۱۹۶۰، در کشورهای گوناگون، به منظور تولید خودروهای نظامی چرخ‌دار و مسلح، کار روی طرح‌های متنوعی آغاز شد. هدف از این کار نیز تولید خودرویی نظامی دارای چابکی خودروهای چرخ‌دار و توان هجومی یک تانک بود.

پروژه استریکر^۱ ارتش ایالات متحده آمریکا تلاشی برای یافتن یک تعادل کارآمد میان قدرت و توانایی جابه‌جایی بود. این پروژه خودرویی نفربر است که به اندازه یک تانک مهلک و همچون یک هامر^۲ سریع است [۱]. نمونه‌هایی از این خودرو حداکثر ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت سرعت دارند. خودروهای استریکر فاصله زیادی از سطح زمین دارند.



معمولاً بیش از چهار چرخ دارند و سیستم تعلیق آنها از نوع مستقل برای تمامی چرخ‌هاست. قوای محرکه این خودروها توسط یک موتور دیزل تأمین می‌شود و معمولاً تمام چرخ‌های آنها محرک است. در شکل ۱ یک استریکر هشت‌چرخ نمایش داده شده است.



شکل ۱. نفربر استریکر، محصولی از ایالات متحده آمریکا

تقریباً تمامی نفربرهای نظامی شش یا هشت‌چرخ، دو محور فرمان‌پذیر دارند. برای استفاده از فرمان‌پذیری در بیش از یک محور، دو دلیل وجود دارد [۱]:

۱. افزایش قابلیت مانور خودرو در پیچش‌های با سرعت پایین. به عبارت دیگر، با استفاده از این سیستم خروج از مسیر خودرو کاهش می‌یابد. این مورد در خودروهای طولی، مانند اتوبوس و تریلر، خود را بیشتر نشان می‌دهد. نفربرهای شش و هشت‌چرخ در زمره خودروهای طولی قرار می‌گیرند.

۲. افزایش پایداری خودرو در پیچش‌های با سرعت بالا. در این صورت، سایش چرخ‌ها کاهش می‌یابد. همچنین در صورت عدم استفاده از فرمان‌پذیری در چند محور، در پیچیدن با سرعت بالا، خودرو منحرف می‌شود. این مورد در خودروهای با طول بیشتر مشهود خواهد بود.

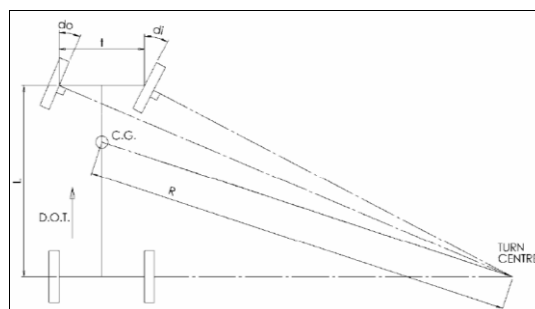
در ادامه، ابتدا روند طراحی سیستم فرمان روی یک محور آمده است. سپس، برای طراحی سیستم فرمان روی دو محور از روندی مشابه استفاده شده است. در پایان، به

اتصالات محورهای محرک فرمان‌پذیر و همچنین سیستم‌های فرمان قدرت اشاره شده است.

طراحی زوایای فرمان در فرمان‌پذیری در یک محور

به‌طور کلی، برای طراحی سیستم فرمان، حرکت خودرو در دو حالت بحرانی بررسی می‌شود: پیچ‌های با سرعت کم و پیچ‌های با سرعت بالا. در فرایند پیچیدن خودرو با سرعت کم، چرخ‌ها نیروی جانبی تولید نمی‌کنند. یا به بیان بهتر، نیروی جانبی ناچیزی تولید می‌کنند. از این‌رو، چرخ‌ها غلتش بدون لغزش خواهند داشت. در سرعت‌های بالا، نیروهای جانبی وارد می‌شوند و روابط زوایای چرخ‌ها به‌سادگی حالت قبل نخواهد بود [۱]. طراحی سیستم فرمان در پیچ‌های با سرعت کم با هدف تأمین هندسه آکرمین انجام می‌گیرد. استفاده از هندسه آکرمین سبب می‌شود که گشتاور مورد نیاز برای پیچاندن فرمان خودرو، متناسب با زاویه فرمان افزایش یابد. این پدیده حس خوبی را به راننده القاء می‌کند. علاوه بر این، کمترین اختلاف در هندسه فرمان نسبت به هندسه آکرمین، سبب افزایش سایش چرخ‌ها و کاهش فرمان‌پذیری خودرو می‌شود. در بررسی هندسه آکرمین نیاز به تعریف زاویه فرمان است. زاویه فرمان برابر با زاویه بین خط مماس بر مسیر حرکت چرخ و خط مماس بر مسیر حرکت خودرو می‌باشد. این مقدار برای چرخ‌های محور عقب برابر صفر است. هندسه‌ای آکرمین نامیده می‌شود که در آن زاویه فرمان برابر با زاویه آکرمین باشد. زاویه آکرمین، زاویه فرمانی است که تحت آن چرخ‌های موجود روی محور فرمان‌پذیر، بدون لغزش می‌غلتند. بنابراین زاویه آکرمین تنها برای حالت حرکت خودرو در پیچ‌های با سرعت پایین قابل تعریف است. شکل ۲ هندسه آکرمین را برای یک خودروی چهارچرخ نشان می‌دهد. باید توجه داشت که لزوم عدم لغزش چرخ‌ها تضمین می‌نماید که خط عمود بر راستای هر چرخ، از مرکز

پیچش بگذرد. همچنین در بررسی هندسه آکرم، مرکز پیچش منطبق بر محور عقب خودرو قرار می‌گیرد.



شکل ۲. هندسه آکرم برای یک خودروی چهارچرخ [۱]

زوایای فرمان آکرم برای دو چرخ موجود روی محور فرمان‌پذیر (محور جلو) با استفاده از روابط ۱ و ۲ به دست می‌آیند [۲]. این زوایا به صورت تقریبی و با در نظر گرفتن کوچک بودن مقادیر آنها به دست می‌آیند:

$$\text{outside wheel angle} : \delta_o \cong \frac{L}{\left(R + \frac{t}{2}\right)} \quad (1)$$

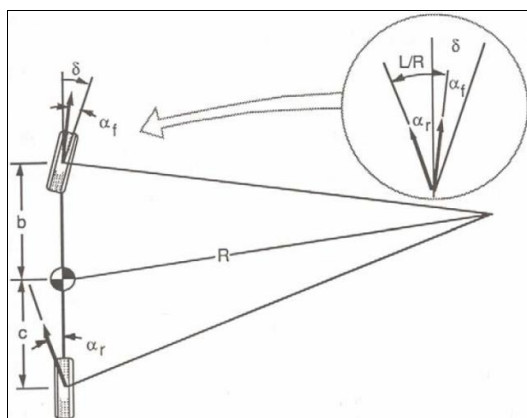
$$\text{outside wheel angle} : \delta_o \cong \frac{L}{\left(R - \frac{t}{2}\right)} \quad (2)$$

برای بررسی عملکرد یک سیستم فرمان می‌توان خودرو را در مدل دوچرخه‌ای بررسی کرد. در این مدل، یک چرخ متناظر با هر محور در نظر گرفته می‌شود. زاویه فرمان نیز به صورت میانگین زاویه فرمان دو چرخ قرار گرفته در دو محور خواهد بود (رابطه ۳). در روابط ۱ تا ۳، مقدار L برابر با فاصله بین دو محور خودرو و مقدار R برابر با شعاع پیچش است.

$$\text{Ackerman angle} : \delta = \frac{L}{R} \quad (3)$$

پس از بررسی سیستم فرمان خودرو در پیچش با سرعت کم، باید سیستم فرمان در پیچش با سرعت بالا را نیز بررسی کرد. در این حالت، نیروهای جانبی و به دنبال آن لغزش در چرخ‌ها وجود خواهد داشت. از این رو مرکز پیچش

خودرو و مرکز نیرو منطبق نخواهند بود. مرکز نیرو، نقطه تقاطع خطوط همراستا با نیروهای جانبی هر چرخ است. همچنین زاویه لغزش، برابر با زاویه بین خط عمود بر محور واصل بین مرکز چرخ و مرکز پیچش خودرو با خط مماس بر مسیر چرخ است. این موارد برای مدل دوچرخه‌ای خودرو، در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳. مدل دوچرخه‌ای خودرو در پیچش‌های با سرعت بالا در این حالت چرخ‌ها لغزش دارند [۱]

در حالت پیچش خودرو با سرعت بالا، باید قانون دوم نیوتن را برای نیروهای جانبی نوشت. در نوشتن قانون دوم، از نیروهای جلوبرندگی و همچنین نیروهای مقاومت غلتشی و درگ هوا صرف نظر می‌شود:

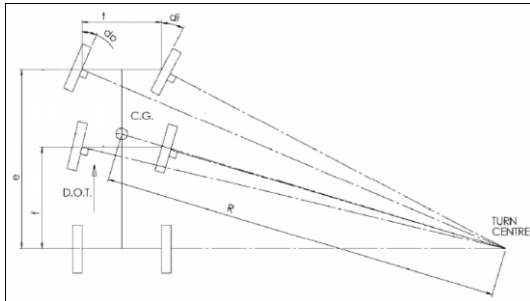
$$\sum F_y = F_{yf} + F_{yr} = \frac{MV^2}{R} \quad (4)$$

به طوری که در این رابطه F_{yf} و F_{yr} به ترتیب نیروهای جانبی در محورهای جلو و عقب خودرو، V سرعت خودرو، R شعاع پیچش و نهایتاً M جرم خودرو است. علاوه بر این با استفاده از معادله ممان نیروها حول مرکز جرم خودرو داریم:

$$F_{yf} b - F_{yr} c = 0 \quad (5)$$

به طوری که در این رابطه مقادیر b و c از شکل ۳ به دست می‌آیند. همچنین مقادیر نیروهای جانبی طبق رابطه ۶ به دست می‌آیند. در این رابطه α_f و α_r برابر با زوایای لغزش در محورهای جلو و عقب خودرو در مدل دوچرخه‌ای

عبارت، رابطه میان زوایای فرمان بین محورهای فرمان‌پذیر می‌باشد. این رابطه، کیفیت عملکرد سیستم فرمان خودرو را تعیین می‌کند. به‌طور عمومی، زوایای محور فرمان‌پذیر عقب با توجه به زوایای محور جلو و شرایط سرعت خودرو در هنگام پیچیدن تعیین می‌گردند.



شکل ۴. هندسه آکرمن برای یک خودروی شش‌چرخ [۱]

نسبت فرمان بین زوایای فرمان محور اول و محور دوم در یک خودرو با دو محور فرمان‌پذیر، نسبت آکرمن نامیده می‌شود. رابطه ۹ این مورد را نشان می‌دهد.

$$Ar = \frac{f/R}{e/R} = \frac{f}{e} \quad (9)$$

در رابطه ۹، مقادیر e و f با استفاده از شکل ۴ مشخص می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار نسبت آکرمن مستقل از طول خودرو و شعاع پیچش است. در حالت پیچش با سرعت بالا، بایستی مقادیر نیروهای جانبی و زوایای لغزش لحاظ گردند. در این حالت، مراکز پیچش و نیرو منطبق نخواهند بود (شکل ۵). در این قسمت نیز، روند طراحی مانند روند ارائه‌شده برای خودروی چهارچرخ است. با این تفاوت که در روند طراحی سیستم فرمان خودروی چهارچرخ، رابطه‌ای مشخص برای مقدار زاویه فرمان به‌دست آمد؛ حال آنکه برای خودروهای دو محور فرمان‌پذیر، یک دستگاه معادلات به‌دست می‌آید.

دستگاه معادلات برای طراحی سیستم فرمان خودروی سه‌محوره که دو محور فرمان‌پذیر دارد، شامل ۵ معادله و ۶ مجهول است [۲]. این مجهولات شامل زوایای فرمان در دو محور جلو (۲ مجهول)، زوایای لغزش در سه محور

هستند. پارامترهای C_{α_f} و C_{α_r} ضرایب سختی جانبی برای محورهای جلو و عقب خودرو می‌باشند.

$$F_{yf} = c_{\alpha_f} \times \alpha_f \quad (6)$$

$$F_{yr} = c_{\alpha_r} \times \alpha_r$$

در پایان با استفاده از هندسه نشان داده شده در شکل ۳، همچنین استفاده از روابط ۵ و ۶، رابطه زاویه فرمان مناسب برای حرکت خودرو در پیچ با سرعت بالا به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۱]:

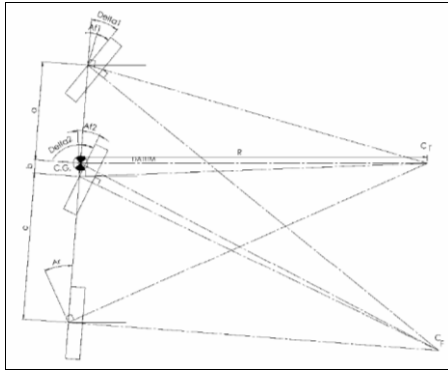
$$\delta = \frac{L}{R} + \alpha_f - \alpha_r \quad (7)$$

$$\delta = \frac{L}{R} + \left(\frac{W_f}{c_{\alpha_f}} - \frac{W_r}{c_{\alpha_r}} \right) \frac{V^2}{gR} \quad (8)$$

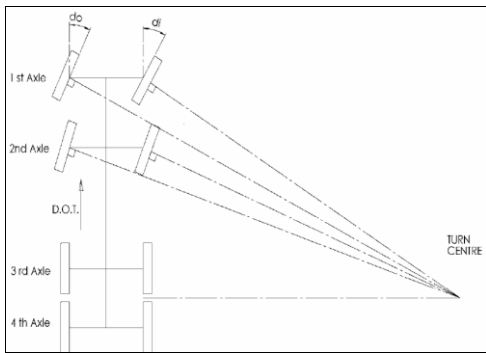
در نوشتن رابطه ۷ علاوه بر هندسه سیستم، تعریف زاویه فرمان و زاویه لغزش نیز استفاده شده است. در رابطه ۸ مقادیر W_f و W_r به‌ترتیب برابر با نیروهای وزن عمودی وارد بر هر یک از دو محور جلو و عقب خودرو هستند. بنابراین برای پیروی سیستم فرمان از هندسه آکرمن در حالت پیچش با سرعت بالا، بایستی زاویه فرمان برابر با مقدار به‌دست آمده از رابطه ۸، توسط سازوکار سیستم فرمان در محور جلو خودرو تأمین شود.

طراحی زوایای فرمان در فرمان‌پذیری در دو محور برای خودروی شش‌چرخ

برای به‌دست آوردن زوایای آکرمن برای یک خودروی سه‌محوره، که دارای دو محور فرمان‌پذیر است، می‌توان در حالت پیچش خودرو با سرعت کم، زوایای آکرمن را به‌دست آورد. توجه داریم که در این حالت، در چرخ‌ها لغزش وجود ندارد و مرکز پیچش و مرکز نیروهای جانبی برهم منطبق است. شکل ۴ این مورد را نشان می‌دهد. توجه داریم که رابطه تعیین مقدار زاویه آکرمن مانند خودروی چهارچرخ است. مسئله مهم در فرمان‌پذیری دو محوره، کنترل استراتژی زوایای فرمان است. منظور از این



شکل ۵. مدل دو چرخه‌ای خودروی شش چرخ در پیچش‌های با سرعت بالا. در این حالت چرخ‌ها لغزش دارند [۱]



شکل ۶. هندسه آکرمن برای یک خودروی هشت چرخ [۱]

دستگاه معادلات سیستم در حالت پیچش با سرعت بالا، شامل ۵ معادله و ۷ مجهول است. این مجهولات شامل زوایای فرمان در دو محور جلو (۲ مجهول)، زوایای لغزش در چهار محور (۴ مجهول) و نسبت فرمان بین دو محور فرمان‌پذیر (۱ مجهول) می‌باشند. از این رو برای حل این دستگاه به جای یک متغیر، روی دو متغیر سعی و خطا صورت می‌گیرد. مدل دو چرخه‌ای برای پیچش با سرعت بالا در خودروی هشت چرخ در شکل ۷ نشان داده شده است. [۲]. در پایان، سازوکار سیستم فرمان طوری طراحی می‌شود که زوایای فرمان و نسبت فرمان مناسب تأمین گردند.

اتصالات یک محور محرک فرمان‌پذیر

تمامی نفربرهای نظامی دارای سیستم فرمان دو محوره، دو محور محرک فرمان‌پذیر دارند. این محورها علاوه بر

(۳ مجهول) و نسبت فرمان بین دو محور فرمان‌پذیر (۱ مجهول) می‌باشند. همچنین ۵ معادله سیستم به صورت زیر هستند:

$$\delta_1 = \alpha_{f1} - \alpha_r + \frac{a+b+c}{R}$$

$$\delta_2 = \alpha_{f2} - \alpha_r + \frac{c}{R}$$

$$\delta_2 = Sr x \delta_1$$

$$\alpha_{f1} C_{yf1}(a) - \alpha_{f2} C_{yf2}(b) - \alpha_r C_{yr}(a+b) = 0$$

$$\alpha_{f1} C_{yf1} + \alpha_{f2} C_{yf2} + \alpha_r C_{yr} = \frac{MV^2}{R}$$

برای حل این دستگاه، روی بازه تغییرات نسبت فرمان (Sr) سعی و خطا صورت می‌گیرد. متناظر با هر مقدار نسبت فرمان، مقادیر زوایای فرمان و لغزش برای هر محور محاسبه می‌شود (با استفاده از رابطه فوق). در نهایت، گزینه متناظر با کمترین مقادیر زوایای لغزش انتخاب می‌شود. در پایان طراحی، مقادیر زوایای فرمان و همچنین نسبت فرمان مناسب تعیین می‌گردند. این مقادیر بایستی توسط سازوکار فرمان خودرو تأمین شود.

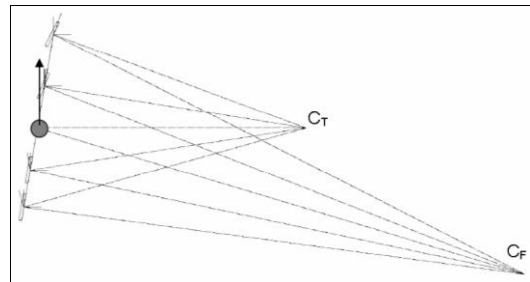
طراحی زوایای فرمان در فرمان‌پذیری روی دو محور برای خودروی هشت چرخ

مراحل طراحی در این قسمت به جز دو مورد کاملاً شبیه به مراحل ارائه شده در قسمت قبل است. این تفاوتها عبارتند از: چون در خودروی هشت چرخ دو محور فرمان‌پذیر داریم، مرکز نیرو را منطبق بر محوری در وسط دو محور عقب خودرو در نظر می‌گیریم. بنابراین زوایای آکرمن در حالت پیچش با سرعت کم برای یک خودروی هشت چرخ برابرند با: (شکل ۶)

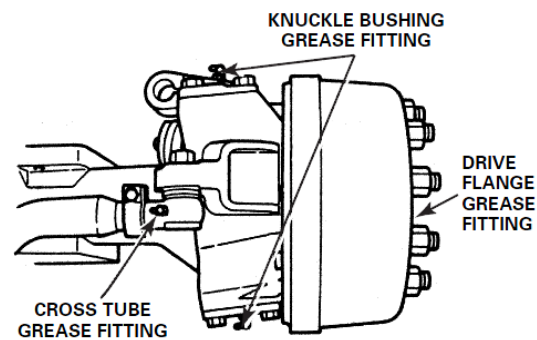
$$\text{First axle Ackerman} = \frac{\left(\frac{a+b+c+d}{2} \right)}{R}$$

$$\text{Second axle Ackerman} = \frac{\left(\frac{b+c+d}{2} \right)}{R}$$

دیفرانسیل در مرکز محور، دارای اتصالات سیستم فرمان در انتهای محور هستند. این اتصالات شامل یک مفصل در هر سر محور است. این مفصل، دو درجه آزادی اضافه در اختیار دو انتهای محور قرار می‌دهد تا بتوانند حول محور عمود بر سطح جاده گردش داشته باشند. این اتصالات در شکل ۸ نشان داده شده‌است [۳].



شکل ۷. مدل دو چرخه‌ای خودروی هشت چرخ در پیچش‌های با سرعت بالا. در این حالت چرخ‌ها لغزش دارند [۱]



شکل ۸ اتصالات انتهای محور و چرخ برای یک محور محرک فرمان‌پذیر [۳]

عملکرد خود ادامه می‌دهد با این تفاوت که راننده بایستی گشتاور بیشتری وارد نماید. سیستم‌های قدرت فرمان به ۳ دسته تقسیم می‌شوند:

۱. سیستم‌های هیدرولیک: در این سیستم‌ها گشتاور کمکی توسط یک سیلندر دوطرفه هیدرولیکی تأمین می‌شود. در این سیستم، فشار هیدرولیکی مورد نیاز توسط یک پمپ هیدرولیکی که از طریق موتور احتراق داخلی خودرو عمل می‌کند، تأمین می‌گردد. در بیشتر خودروها، از این نوع سیستم فرمان قدرت استفاده می‌شود.

۲. سیستم‌های الکتروهیدرولیک: عملکرد این سیستم مشابه سیستم هیدرولیک است. با این تفاوت که توان مورد نیاز برای عملکرد پمپ هیدرولیکی، توسط یک موتور الکتریکی که مستقل از موتور احتراق داخلی خودرو عمل می‌کند، تأمین می‌شود.

۳. سیستم‌های الکتریکی: در این سیستم‌ها، گشتاور کمکی سیستم فرمان مستقیماً توسط یک موتور الکتریکی و یک چرخنده به سازوکار سیستم فرمان اعمال می‌گردد.

در نفربرهای نظامی مورد بحث، معمولاً از سیستم قدرت هیدرولیکی در سیستم فرمان استفاده می‌شود. بدین ترتیب راننده گشتاور ناچیزی را به‌هنگام چرخاندن چرخ فرمان خودرو اعمال می‌کند.



شکل ۹. سازوکار چندمیله‌ای سیستم فرمان در دو محور در یک نفربر نظامی

سیستم‌های فرمان قدرت

امروزه با هدف کاهش گشتاور مورد نیاز برای اعمال فرمان بر خودرو، از سیستم‌های قدرت در سازوکار سیستم فرمان (شکل ۹) استفاده می‌شود. در اکثر این سیستم‌ها، اتصالات مکانیکی در حالت معمول حفظ شده‌است، تنها بخش اعظمی از گشتاور مورد نیاز برای چرخش محور فرمان‌پذیر توسط سیستم قدرت کمکی تأمین می‌گردد. به عبارت دیگر، در صورت عدم عملکرد سیستم قدرت، سیستم فرمان به

۱. استریکر (Stryker) از جمله خودروهای زرهی و جنگی هشت‌چرخ است که چهار چرخ محرک دارد. پروژه استریکر خانواده‌ای از خودروهای همسان اما ویژه است که تمامی آنها قطعات، فناوری ساخت و ساختار یکسانی دارند. این خودروهای نظامی می‌تواند در کمتر از ۹۶ ساعت در هر جای دنیا آماده سرویس‌دهی شوند. استریکر، بعد از تانک‌های ام. ۲ بردلی (M2 Bradley) و ام. ۳ بردلی (M3 Bradley)، نخستین خودروی زره‌پوش ارتش ایالات متحده آمریکا است که از سال ۱۹۸۰ م ساخته می‌شود [ویراستار].

۲. هامر (Hummer) یک شرکت خودروساز آمریکایی، در مالکیت جنرال موتورز، است که در زمینه ساخت خودروهای بیابانی فعالیت می‌کند. نمونه‌های نظامی این خودرو با نام هاموی (Humvee) به‌طور گسترده‌ای توسط ارتش ایالات متحده آمریکا به‌کار می‌روند [ویراستار].

- [1] Eeden, C. J. V., the Steering Relationship Between the First and Second Axles of A 6*6 Off-Road Military Vehicle. Faculty of Engineering, *Built environment and information Technology*, University of Pertoria, 2007.
- [2] Gillespie, T. D., *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, Inc, 1992.
- [3] Bennet, S., *Heavy Duty Truck Systems*, Fifth Edition. Delmar Gengage Learning, 2011.

