

# طراحی، ساخت و کنترل یک مدل خودرو بادی ایرفویلی

مرتضی خیاط (دانشجوی دکتری)

منوچهر راد (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

در این نوشتار طراحی و ساخت یک مدل خودرو بادی ایرفویلی به همراه روش کنترل حرکت آن ارائه شده است. این مدل براساس آنالیزها و نظریه‌های دقیق مهندسی، برای اولین بار در کشور ساخته شده است. نیروی محرک خودروهای بادی صرفاً از انرژی باد، که انرژی در دسترس است، تأمین می‌شود. در برخی از خودروهای بادی به جای بادبان از ایرفویل صلب که فناوری جدیدتری است، استفاده می‌شود. اساس حرکت در این نوع خودروها استفاده از نیروی برآ و پسای ایجاد شده به واسطه‌ی وزش باد بر روی ایرفویل خودرو و تبدیل این نیروها به نیروی جلوبرنده با استفاده از تنظیم مناسب جهت ایرفویل است. بدین طریق خودرو می‌تواند با کنترل صحیح، در جهتی متفاوت با جهت وزش باد، و حتی در خلاف جهت باد حرکت کند. خودرو طراحی شده یک مدل بدون سرنشین است و به منظور چرخش ایرفویل و چرخ جلو در هر جهت دلخواه از دو موتور الکتریکی بهره می‌برد. این دو موتور به وسیله‌ی پالس‌های رادیویی ایجاد شده توسط یک کنترل‌کننده‌ی رادیویی چهارکاناله فرمان می‌پذیرند. محاسبات مربوط به طراحی این خودرو به عنوان اصول طراحی خودروهای بادی در مقیاس‌های مختلف، با سرنشین یا بدون سرنشین مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از آزمایش دینامیکی این خودرو نشان می‌دهد که بهترین نقطه برای شروع حرکت خودرو نقطه‌ی است که در آن باد طبیعی با زاویه‌ی  $9^\circ$  درجه نسبت به محور طولی خودرو بوزد. همچنین در سرعت‌های باد حدود  $10$  متر بر ثانیه سرعت خودرو بیشتر از  $175$  سرعت باد می‌شود که در مقایسه با خودروهای مدل هم‌سایز، با بادبان غیر صلب، رکورد بسیار بالایی است.

khayyat@mech.sharif.edu  
rad@sharif.edu

واژگان کلیدی: بال - خودرو بادی - آیرودینامیک.

## مقدمه

در این نوشتار اصول طراحی یک مدل خودرو بادی، که در آن به جای بادبان از یک ایرفویل صلب استفاده می‌شود، ارائه شده است. این خودرو از نوع بدون سرنشین بوده و با کنترل از راه دور هدایت می‌شود. شکل ۱ نمایی از خودرو طراحی شده را نشان می‌دهد. در طراحی این خودرو اصول پایه‌ی نظیر لغزش و واژگونی که عملکرد خودرو را محدود می‌کنند، در نظر گرفته شده است. منظور از عملکرد مطلوب در خودرو بادی، سرعت بالاتر خودرو نسبت به سرعت باد طبیعی و همچنین سرعت مطلق بالا است. تغییر پارامترهای خودرو و آزمایش این تغییرات در تونل باد، دید بسیار مناسبی برای طراحی دقیق این خودرو ارائه می‌دهد اما استفاده از این روش با توجه به هزینه‌ی بسیار بالای آزمایش‌ها، مناسب نیست. بنابراین استفاده از آنالیزهای مهندسی و روش‌های نظری، به عنوان روشی بهینه برای طراحی این نوع خودرو مطرح می‌شود. بدین منظور کد محاسباتی آنالیز حرکت خودرو بادی به عنوان یک ابزار نرم‌افزاری برای تخمین مشخصه‌های عملکردی این خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد.<sup>[۱]</sup> اهداف مختلفی که این کد دنبال می‌کند عبارت‌اند از: تخمین مقاومت برای حرکت، به دست آوردن کلیه نیروها و گشتاورهای وارد بر خودرو، محاسبات اولیه‌ی متغیرها (متغیرهایی نظیر مساحت ایرفویل، ابعاد اولیه‌ی طرح، پایداری خودرو،

## مثلث سرعت خودرو بادی

مثلث سرعت که رابطه‌ی بین سرعت باد طبیعی ( $V_T$ )، سرعت ایجاد شده به واسطه‌ی حرکت رو به جلوی خودرو ( $V_L$ )، و سرعت باد ظاهری ( $V_A$ ) را نشان می‌دهد، در شکل ۲ نمایش داده شده است. براساس این شکل، زاویه‌ی باد ظاهری، از طریق روابط ۱ و ۲ قابل دست‌یابی است:

$$\beta = \arctan\left(\frac{V_T \sin \phi}{V_T \cos \phi + V_L}\right) \beta \leq \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

جدول ۱. نسبت سرعت‌ها در زوایای مختلف باد طبیعی.

$\phi$	$\frac{V_T}{V_L}$	$\frac{V_T}{V_A}$	$\frac{V_L}{V_A}$	کمیت شاخص
$\frac{\pi}{\gamma}$	$\tan(\beta)$	$\sin(\beta)$	$\cos(\beta)$	$(V_A)_{\max}$
$\frac{\pi}{\gamma} + \frac{\beta}{\gamma}$	$\gamma \sin(\frac{\beta}{\gamma})$	$\gamma \sin(\frac{\beta}{\gamma})$	۱	$V_L = V_A$
$\frac{\pi}{\gamma} + \beta$	$\sin(\beta)$	$\tan(\beta)$	$\frac{1}{\cos(\beta)}$	$(V_L)_{\max}$

## نیروهای آیرودینامیکی و محاسبه‌ی مرکز اثر نیروی مقاوم جانبی

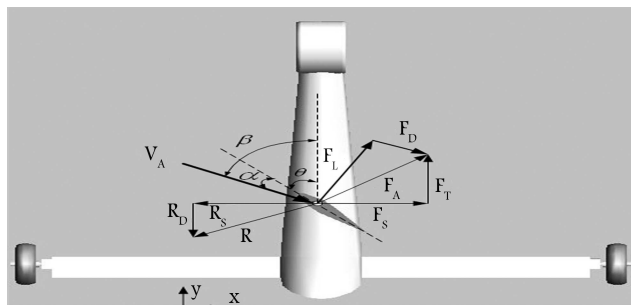
براساس مثلث سرعت می‌توان گفت مقدار و جهت سرعت باد ظاهری، اندازه و جهت نیروهای اعمال شده بر ایرفویل خودرو را تعیین می‌کند. برآیند نیروهای برآ و پسای وارد بر ایرفویل خودرو، نیروی آیرودینامیکی کل وارده بر خودرو را تشکیل می‌دهد. این نیرو که با نماد  $F_A$  مشخص می‌شود، در مرکز فشار ایرفویل وارد می‌شود. یکی از مؤلفه‌های این نیرو در راستای محور طولی خودرو و نیرویی جلوبرنده است. مؤلفه دیگر که در جهت جانبی خودرو به صورت عمود بر مسیر حرکت ایجاد می‌شود نیرویی جانبی است و باید با نیروی اعمالی از طرف چرخ‌ها خنثی شود. در واقع در خودرو بادی نیروی اصطکاک بین چرخ‌ها و زمین نیروی مقاوم جانبی را تشکیل می‌دهد. براساس آنچه که در شکل ۳ نمایش داده شده، معادلات حرکت خودرو بادی چنین است:

$$\begin{cases} F_L \cos(\theta + \alpha) + F_D \sin(\theta + \alpha) - R_S = m\ddot{x} \\ F_L \sin(\theta + \alpha) - F_D \cos(\theta + \alpha) - R_D = m\ddot{y} \end{cases} \quad (7)$$

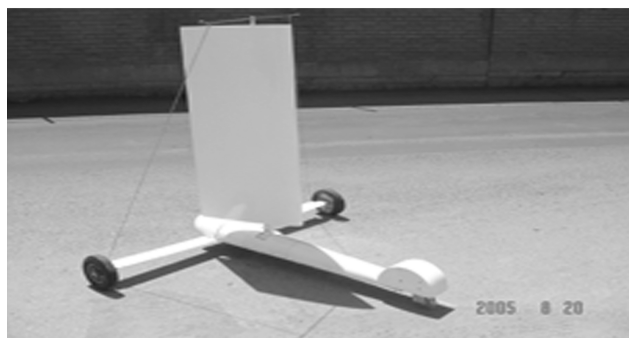
در این رابطه  $\ddot{x}$  و  $\ddot{y}$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی شتاب خودرو در جهات طولی و جانبی اند.  $R_D$  نیز نشان‌دهنده‌ی کل نیروی پسای اعمالی بر خودرو است که از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$R_D = F_{DB} + F_{DA} + F_{DW} \quad (8)$$

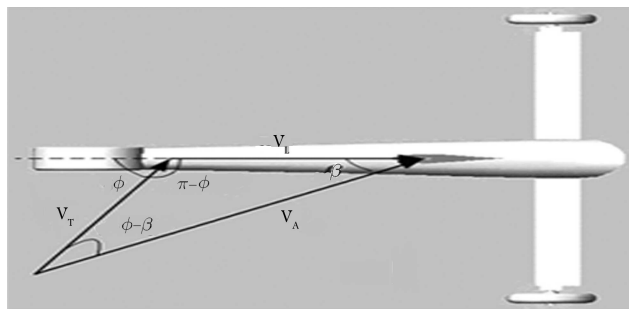
هنگامی که  $\ddot{x}$  و  $\ddot{y}$  مساوی صفر شوند، خودرو در حالت تعادل است و بیشینه‌ی سرعت در حالت پایدار آن به دست می‌آید. محاسبه‌ی مرکز اثر نیروی مقاوم جانبی، نیرویی که خلاف جهت حرکت عرضی خودرو به وجود می‌آید، از نقطه‌نظر پایداری جانبی خودرو حائز اهمیت است. مرکز اثر این نیرو نقطه‌یی است که اگر نیروهای عرضی وارد بر خودرو در این نقطه وارد شوند فقط باعث لغزش بدون چرخش خودرو به سمت جانبی می‌شوند. شکل‌های ۴ و ۵ نیروها و گشتاورهای استاتیکی وارد بر خودرو را به ترتیب در دو حالت عمودی و جانبی نشان می‌دهند. براساس



شکل ۳. شماتیک نیروهای وارد بر خودروی بادی.



شکل ۱. نمونه‌ی خودروی بادی.



شکل ۲. مثلث سرعت خودروی بادی.

$$\beta = \arctan \left( \frac{V_T \sin \left( \phi - \frac{\pi}{\gamma} \right) - V_L}{V_T \cos \left( \phi - \frac{\pi}{\gamma} \right)} \right) + \frac{\pi}{\gamma}; \beta > \frac{\pi}{\gamma} \quad (2)$$

با استفاده از این رابطه‌ها، مشتق  $V_L$  نسبت به  $\phi$  در سرعت باد طبیعی ثابت و زاویه‌ی باد ظاهری ثابت، به ترتیب از روابط ۳ و ۴ به دست می‌آید:

$$\frac{\partial V_L}{\partial \phi} = \frac{V_T}{\tan \beta} \cos \phi + V_T \sin \phi \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_L}{\partial \phi} = -V_T \cos \phi \tan \left( \beta - \frac{\pi}{\gamma} \right) + V_T \sin \phi \quad (4)$$

اگر در هر یک از روابط ۳ و ۴،  $\frac{\partial V_L}{\partial \phi} = 0$  قرار داده شود، زاویه‌ی باد طبیعی  $\phi = \frac{\pi}{\gamma} + \beta$  می‌شود. در این زاویه  $\frac{\partial^2 V_L}{\partial \phi^2} < 0$  است؛ و بنابراین سرعت خودرو بیشینه خواهد شد. با استفاده از شکل ۲ سرعت باد ظاهری از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$V_A = \sqrt{V_T^2 + V_L^2 + 2V_L V_T \cos \phi} \quad (5)$$

با جایگزینی روابط ۱ و ۲ در رابطه‌ی ۵ و مشتق‌گیری از  $V_A$  نسبت به  $\phi$  در سرعت باد طبیعی ثابت و زاویه‌ی باد ظاهری ثابت، می‌توان نتیجه گرفت:

$$\frac{\partial V_A}{\partial \phi} = \frac{2V_L \frac{\partial V_L}{\partial \phi} + 2V_T \frac{\partial V_L}{\partial \phi} \cos \phi - 2V_L V_T \sin \phi}{2\sqrt{V_T^2 + V_L^2 + 2V_L V_T \cos \phi}} \quad (6)$$

اگر در رابطه‌ی ۶،  $\frac{\partial V_A}{\partial \phi} = 0$  قرار داده شود، آنگاه  $\phi = \frac{\pi}{\gamma}$  خواهد شد. در این زاویه  $\frac{\partial^2 V_A}{\partial \phi^2} < 0$  است، و بنابراین سرعت باد ظاهری بیشینه خواهد شد. با دقت در شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت که اگر  $\phi - \beta = \pi - \phi$ ، در این صورت مثلث سرعت به مثلث متساوی‌الساقینی تبدیل می‌شود که در آن  $V_A = V_L$  است. به عبارت دیگر، اگر  $\phi = \frac{\pi}{\gamma} + \frac{\beta}{\gamma}$  باشد آنگاه سرعت باد ظاهری با سرعت خودرو برابر می‌شود. این نتایج به طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

ظاهری را تشکیل می‌دهد. سرعت باد ظاهری ممکن است حتی تا ۳ برابر سرعت واقعی باد افزایش یابد. این سرعت می‌تواند بر نیروی وارده بر ایرفویل خودرو بیفزاید و باعث واژگونی خودرو شود. بنابراین لازم است علاوه بر نیروی وزن، نیروی دیگری هم‌جهت با آن به وجود آید تا بتواند یک گشتاور راست‌گرداننده حول محور واژگونی خودرو ایجاد کند. این نیرو می‌تواند در اکسل عقب خودرو ایجاد شود. بنابراین برای ایجاد نیروی قائم رو به پایین در اکسل عقب خودرو، باید این اکسل به شکل ایرفویل ساخته شود و زاویه‌ی حمله‌ی آن چنان تنظیم شود که نیروی برای منفی ایجاد کند. شکل ۶ نمایی از اکسل عقب خودروی بادی ساخته شده را که در آن از یک ایرفویل متقارن با زاویه‌ی حمله‌ی ثابت منفی برای ایجاد نیروی برای منفی استفاده شده است، نشان می‌دهد. نیروهای برآ و پسا‌ی اکسل مطابق روابط ۱۴ و ۱۵ به دست می‌آیند:

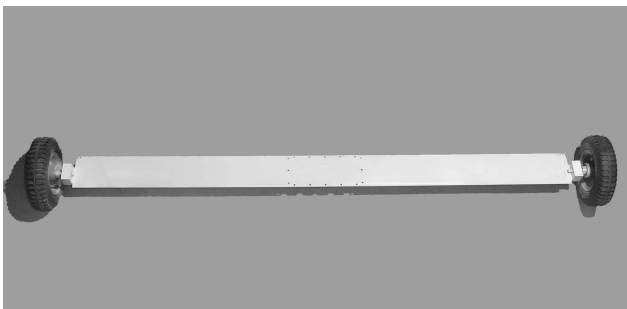
$$F_{LA} = \frac{1}{2} \rho V_F^2 C_{LA} A_{PA} \quad (14)$$

$$F_{DA} = \frac{1}{2} \rho V_F^2 C_{DA} A_{PA} \quad (15)$$

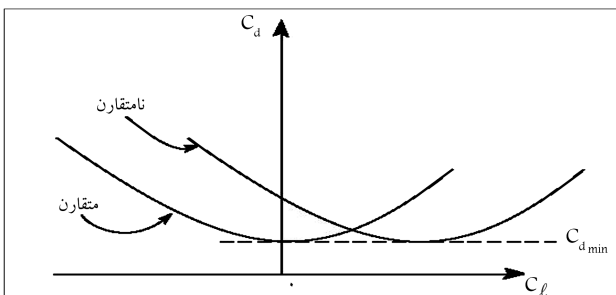
که در آن‌ها  $A_{PA}$  تقریب خطی از سطح مؤثر اکسل،  $C_{LA}$  و  $C_{DA}$  به ترتیب ضرایب برآ و پسا‌ی اکسل،  $\rho$  چگالی هوا و  $V_F$  تصویر بردار سرعت باد ظاهری در راستای محور طولی خودرو است.  $V_F$  از معادله‌ی ۱۶ به دست می‌آید:

$$V_F = V_A \times \cos(\beta) \quad (16)$$

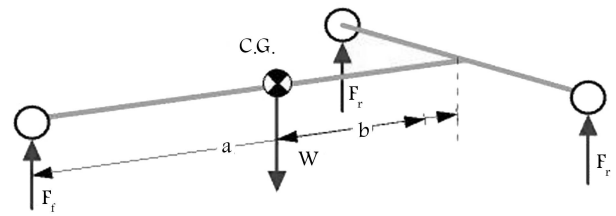
اکسل‌های با ایرفویل نامتقارن در مقایسه با نوع متقارن هم‌سایز، نیروی برآ و پسا‌ی بیشتری ایجاد می‌کنند. در شکل ۷ ضرایب برآ و پسا برای دو ایرفویل متقارن و نامتقارن مقایسه شده‌اند.<sup>[۱]</sup> علت نیروی پسا‌ی بیشتر در اکسل‌های نامتقارن افزایش مقاومت در برابر حرکت نامطلوب است، اما نیروی برای بیشتر نیز پایداری خودرو را در برابر واژگونی به دلیل افزایش نیروی پایین برنده افزایش می‌دهد. با افزایش پایداری می‌توان سطح ایرفویل مرکزی خودرو را که برای تولید نیروی محرک به کار می‌رود



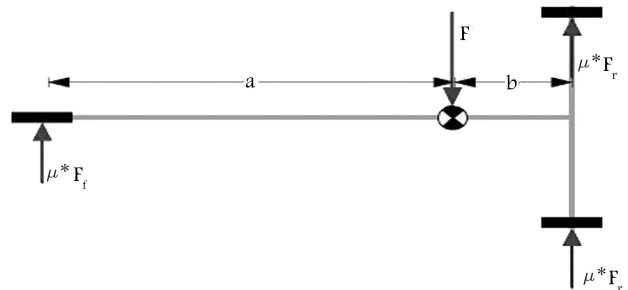
شکل ۶. طرح اکسل عقب خودرو بادی.



شکل ۷. مشخصات پسا برای یک ایرفویل متقارن و نامتقارن.



شکل ۴. نیروهای عمودی وارد بر خودرو در حالت استاتیکی.



شکل ۵. نیروهای جانبی وارد بر خودرو در حالت استاتیکی.

شکل ۴، معادلات ۹ و ۱۰ که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی نیروهای عمودی و گشتاور کله‌زنی<sup>۱</sup> حول مرکز جرم‌اند، به دست می‌آیند:

$$F_f + 2F_r = W \quad (9)$$

$$a \times F_f = 2b \times F_r \quad (10)$$

و براساس شکل ۵ معادلات ۱۱ و ۱۲ که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی نیروهای جانبی و گشتاور چرخ‌زنی<sup>۲</sup> حول مرکز اثر نیروی مقاوم جانبی‌اند، به دست می‌آیند:

$$\mu \times F_f + 2\mu \times F_r = F \quad (11)$$

$$a \times \mu \times F_f = 2b \times \mu \times F_r \quad (12)$$

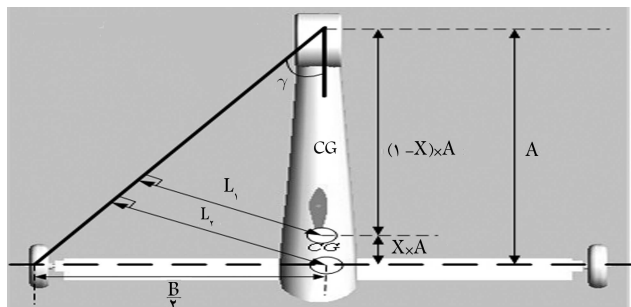
از حل معادلات ۱۰ و ۱۲ به یک نتیجه‌ی مشابه که در آن رابطه‌ی بین نیروی چرخ جلو و چرخ‌های عقب مشخص شده است، خواهیم رسید. این رابطه طبق معادله‌ی ۱۳ بیان می‌شود:

$$F_f = \frac{2b}{a} \times F_r \quad (13)$$

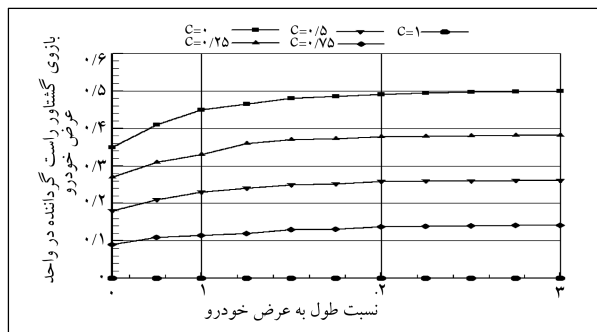
معادلات نشان می‌دهند در صورت برابر بودن اصطکاک چرخ‌ها، مرکز جرم و مرکز اثر نیروی مقاوم جانبی در حالت استاتیکی بر هم منطبق‌اند. اگر اصطکاک در چرخ‌های بیشتر از چرخ دیگر باشد مرکز اثر نیروی جانبی به سمت چرخ با اصطکاک بیشتر حرکت می‌کند. بدیهی است که با قراردادن مرکز فشار ایرفویل در کنار مرکز اثر نیروی مقاوم جانبی می‌توان گشتاورهای ایجاد شده را که باعث چرخش خودرو به طرف باد، یا خلاف جهت آن، می‌شوند به راحتی کنترل کرد. بنابراین محل اتصال محور ایرفویل بر روی بدنه‌ی خودرو، همان نقطه‌ی اثر نیروی مقاوم جانبی است.

## طرح اکسل عقب خودرو بادی

وزن خودرو یکی از نیروهایی است که از واژگونی خودرو جلوگیری می‌کند. همان‌طور که گفته شد برآیند بردارهای سرعت باد طبیعی و سرعت خودرو، بردار سرعت باد



شکل ۹. شماتیک بازوی گشتاورهای راست‌گرداننده نیروی وزن و نیروی برای اکسل عقب.

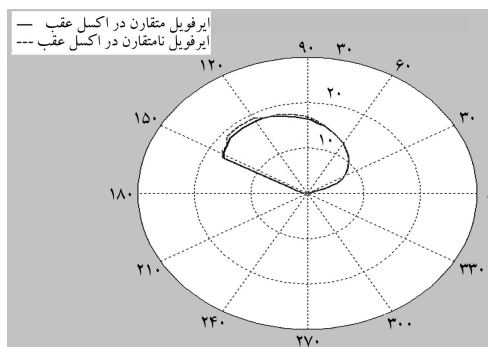


شکل ۱۰. رابطه‌ی بین بازوی گشتاور راست‌گرداننده نیروی وزن با نسبت طول به عرض خودرو در موقعیت‌های متفاوت مرکز جرم.



شکل ۱۱. رابطه‌ی بین بازوی گشتاور راست‌گرداننده نیروی وزن با نسبت طول به عرض خودرو طراحی شده.

وقتی مرکز جرم به سمت عقب خودرو حرکت می‌کند، مقدار گشتاور راست‌گرداننده افزایش می‌یابد. به همین صورت در یک موقعیت ثابت از مرکز جرم، با افزایش نسبت  $\frac{A}{B}$ ، مقدار گشتاور راست‌گرداننده افزایش می‌یابد. بر این اساس می‌توان گفت هرچه طول خودرو بیشتر باشد، مقدار گشتاور راست‌گرداننده بیشتر می‌شود. این نتایج در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. حال اگر فرض شود وزن خودرو مستقل از نسبت  $\frac{A}{B}$  است، با افزایش طول خودرو موقعیت مرکز جرم تغییر کرده و مقدار  $X$  افزایش می‌یابد که این افزایش سبب کاهش گشتاور راست‌گرداننده می‌شود. بنابراین بین نسبت  $\frac{A}{B}$  و موقعیت مرکز جرم می‌بایست تعادلی ایجاد شود. براساس آنالیز بهینه‌سازی، مقدار این نسبت برای خودرو بادی مدل ۱/۲۵ است. نتایج این آنالیز در شکل ۱۱ نشان داده شده است. طبق استانداردهای جهانی نسبت طول به عرض در این نوع خودروها بین ۱/۲ تا ۱/۵ در نظر گرفته می‌شود.<sup>[۲]</sup> گشتاور راست‌گردان بیشتر در واحد عرض خودرو، و برای غلبه بر گشتاور واژگونی که توسط ایرفویل مرکزی خودرو ایجاد می‌شود،



شکل ۸. سرعت خودرو در زوایای متفاوت باد طبیعی در دو حالت استفاده از اکسل با ایرفویل متقارن و نامتقارن.

افزایش داد و در نتیجه به نیروی محرک بیشتری دست یافت. شکل ۸ نمودار سرعت خودرو در برابر زاویه‌ی طبیعی باد در مختصات قطبی را نشان می‌دهد. این نمودار برای دو طرح اکسل به صورت ایرفویل متقارن و نامتقارن رسم شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، سرعت خودرو در حالت استفاده از اکسل با ایرفویل نامتقارن کمی بیشتر از حالت متقارن است. هر دو این اکسل‌ها در باد با سرعت ۵ متر بر ثانیه، و با کد محاسباتی آنالیز حرکت خودروهای بادی بررسی شده‌اند.<sup>[۱]</sup> با توجه به تأثیر اندک اکسل با ایرفویل نامتقارن بر سرعت نهایی خودرو، که در واقع عملکرد خودرو را تعیین می‌کند، در خودرو بادی مدل از یک بال با مقطع ایرفویل متقارن NACA00۱۲ برای طرح اکسل عقب استفاده شده است. این طرح به‌گونه‌ی است که خاصیت ارتجاعی داشته تا به‌جای استفاده از سیستم تعلیق از نیروی کماتش اکسل استفاده شود. در واقع اکسل عقب این خودرو وظیفه‌ی سیستم تعلیق را نیز عهده‌دار است.

## طراحی ایرفویل خودرو براساس مقدار گشتاور راست‌گرداننده

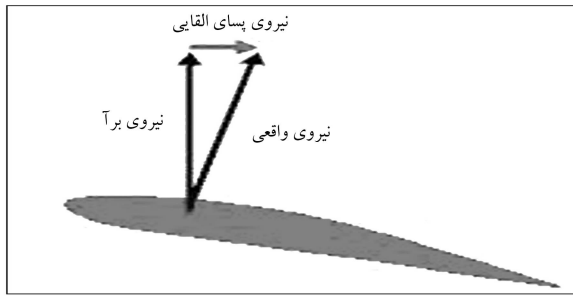
در یک خودرو بادی، هدف اصلی کم‌کردن وزن به منظور رسیدن به شتاب بالاتر است. البته وزن خودرو باید به‌اندازه‌ی باشد که گشتاور ناشی از نیروی باد را که باعث واژگونی خودرو می‌شود، خنثی کند. در واقع وزن و نیروی برای منفی اکسل عقب خودرو، به‌منظور حفظ پایداری خودرو یک گشتاور راست‌گرداننده در مقابل گشتاور واژگونی ایجاد می‌کنند. بنابراین یکی از نکات مهم مورد نظر در طراحی خودرو ایجاد گشتاور راست‌گرداننده بیشتر در واحد جرم خودرو است.<sup>[۲]</sup> شکل ۹ بازوی گشتاورهای راست‌گرداننده ناشی از نیروی وزن و نیروی برای اکسل عقب خودرو را نشان می‌دهد. بر این اساس، گشتاور راست‌گرداننده حول محور واژگونی خودرو طبق معادله‌ی ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$M_R = W \times (1 - X) \times \frac{B}{\gamma} \times \cos \gamma + F_{LA} \times \frac{B}{\gamma} \times \cos \gamma \quad (17)$$

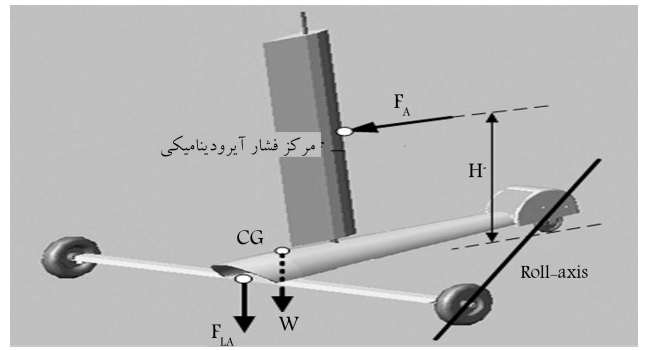
که در آن زاویه‌ی  $\gamma$  از رابطه‌ی ۱۸ به دست می‌آید:

$$\tan \gamma = \frac{B}{\gamma A} \quad (18)$$

در یک خودرو بادی نسبت طول به عرض خودرو  $\left(\frac{A}{B}\right)$  و موقعیت مرکز جرم بر گشتاور ناشی از نیروی وزن حول محور واژگونی خودرو تأثیر می‌گذارد. با توجه به رابطه‌ی ۱۷ در یک نسبت  $\frac{A}{B}$  ثابت، وقتی مقدار  $X$  کاهش می‌یابد، و به عبارت دیگر



شکل ۱۳. پسای القایی.



شکل ۱۲. نمایی از بازوی گشتاور واژگونی.

لازم است. گشتاور واژگونی مطابق شکل ۱۲ از معادله‌ی ۱۹ به دست می‌آید:

$$M_F = F_{Lip} \times H \quad (19)$$

که در آن  $F_{Lip}$  معرف نیروی واژگونی است و از معادله‌ی ۲۰ به دست می‌آید:

$$F_{Lip} = F_r \sin \gamma + F_S \cos \gamma \quad (20)$$

واژگونی خودرو هنگامی اتفاق می‌افتد که  $M_F > M_R$  شود. بنابراین طول ایرفویل باید به‌گونه‌ی طراحی شود که گشتاور واژگونی ایجاد شده توسط آن کوچک باشد. از طرفی در یک بال متناهی که اثرات سه‌بعدی جریان وجود دارد، با افزایش زاویه‌ی حمله نیرویی به وجود می‌آید که مؤلفه‌ی این نیرو در جهت باد نسبی، نیروی پسای القایی نامیده می‌شود (شکل ۱۳). ضریب پسای کل در یک بال محدود از رابطه‌ی ۲۱ به دست می‌آید.<sup>[۵]</sup>

$$C_D = C_{D_0} + C_{D_i} + C_{D_0} + \frac{C_L^2}{\pi AR} \quad (21)$$

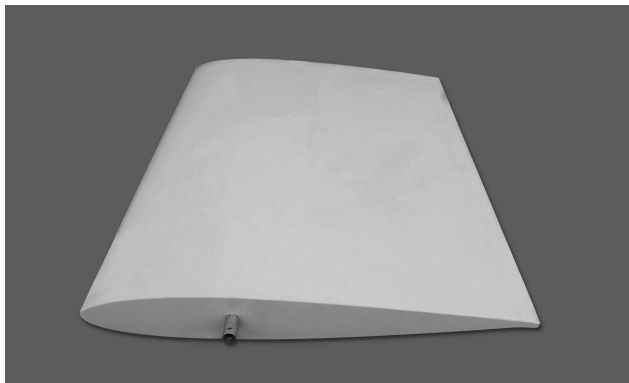
که در آن  $AR$  نسبت منظر بال،  $C_{D_0}$  ضریب پسای بال در زاویه‌ی حمله‌ی صفر درجه، و  $C_L$  ضریب برآی بال است. برای کم‌کردن پسای القایی باید نسبت منظر بال افزایش یابد. با افزایش نسبت منظر در یک خط وتر ثابت از بال، طول بال افزایش می‌یابد و این افزایش طول، بازوی گشتاور واژگونی را افزایش داده و باعث هرچه ناپایدارتر شدن خودرو می‌شود. روش دیگر برای افزایش نسبت منظر، کاهش اندازه‌ی خط وتر بال است. این راه نیز باعث کاهش سطح مؤثر بال و کاهش نیروی محرک ایجاد شده توسط آن می‌شود. بنابراین برای طراحی بال باید ضریب پسای القایی در رابطه با نسبت منظر بهینه شود. با استفاده از آنالیز بهینه‌سازی، نسبت منظر بال در خودرو بادی مدل، ۲/۴ می‌شود. مقطع بال ایرفویل متقارن NACA00۱۲ در نظر گرفته شده است. شیب منحنی برآ برحسب زاویه‌ی حمله برای این مقطع، از رابطه‌ی ۲۲ به دست می‌آید:<sup>[۶]</sup>

$$C_{L\alpha} = \frac{C_L}{\alpha - \alpha_0} \approx 2\pi \quad (22)$$

که برای مقطع NACA00۱۲،  $C_{L\alpha} \approx 5.762$ ،  $\alpha_0 = 0^\circ$  و زاویه‌ی واماندگی حدود ۱۲ درجه است. پس از زاویه‌ی واماندگی نیز رابطه‌ی تجربی برای تعیین ضریب برآ به کار گرفته می‌شود.<sup>[۶]</sup> نیروهای برآ و پسای بال از روابط ۲۳ و ۲۴ به دست می‌آیند:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho V_A^2 C_L A_{PW} \quad (23)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V_A^2 C_D A_{PW} \quad (24)$$



شکل ۱۴. نمایی از بال خودرو.

که در آنها  $APW$  تقریب خطی سطح مؤثر بال برحسب زاویه‌ی حمله است. شکل ۱۴ نمایی از بال (ایرفویل) خودرو بادی را نشان می‌دهد. این بال برای هرچه سبک‌تر شدن از جنس چوب صنوبر با روکش فایبرکربن ساخته شده است.

### انتخاب چرخ‌ها

چرخ‌های یک خودرو بادی علاوه بر ایجاد نیروی مقاوم جانبی که در خلاف جهت حرکت جانبی خودرو به وجود می‌آید، موجد نیروی نیز هستند. این نیروی پسا در معادلات دینامیکی حرکت خودرو به‌عنوان یک نیروی مقاوم ظاهر می‌شود. به‌منظور محاسبه‌ی نیروی پسای چرخ‌ها، مقدار چرخش چرخ در هر ثانیه محاسبه می‌شود. این میزان چرخش از معادله‌ی ۲۵ به دست می‌آید:

$$PRS = \frac{V_L}{\pi \times DW} \quad (25)$$

پس از محاسبه‌ی  $RPS$  چرخ‌های جلو و عقب، همچنین یافتن ضریب مقاومت غلتشی چرخ‌ها ( $S_W$ ) که بر هر چرخ متفاوت است، نیروی مقاوم کل ایجاد شده توسط چرخ‌های خودرو طبق رابطه‌ی ۲۶ محاسبه می‌شود:

$$RDW = S_W \times (RPS_{Front} + 2 \times RPS_{Rear}) \quad (26)$$

فرایند انتخاب چرخ‌ها در خودروهای بادی به‌گونه‌ای است که نیروی اصطکاک ایجاد شده توسط آنها مانع از لغزش خودرو می‌شود. با فرض یکسان بودن ضریب اصطکاک برای چرخ‌ها، نیروی اصطکاک ایجاد شده توسط آنها از رابطه‌ی ۲۷ به دست می‌آید:

$$F_f = \mu \times F_{Down} \quad (27)$$

یک کنترل‌کننده‌ی رادیویی چهارکاناله فرمان می‌پذیرند و قابلیت چرخش در  $360^\circ$  درجه را دارند. این قابلیت پس از برنامه‌ریزی کامل برای سرو موتورها به دست آمده است. دور خروجی هر دو موتور سرو با یک سازوکار گیربکس اضافی کاهش می‌یابد. این کاهش دور براساس معادله‌ی  $30^\circ$  است که به منظور کنترل راحت‌تر تغییر زاویه‌ی بال مرکزی و فرمان خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (30)$$

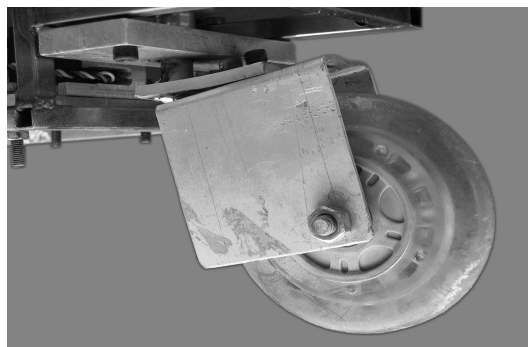
در سازوکار گیربکس از چرخ‌دنده‌های ساده‌ی پلی‌آمیدی که طراحی آنها براساس استحکام (مقاومت) خمشی در ریشه‌ی دنده بوده، استفاده شده است. این استحکام خمشی مطابق معادله‌ی ۳۱ محاسبه می‌شود: [۷]

$$S_e = \frac{\sqrt[3]{2T \times nG}}{10^6 K_v j N m^3} \quad (31)$$

به منظور آنالیز چرخ‌دنده‌ها از نظر استحکام سطحی برای جلوگیری از خرابی یا شکست سطحی دنده‌های چرخ‌دنده از رابطه‌ی ۳۲ استفاده شده است: [۷]

$$S_{e_s} = -C_p \sqrt{\frac{2T \times nG}{10^6 k_v I N^2 m^3}} \quad (32)$$

شکل ۱۷ نمایی از سازوکار سرو موتور و گیربکس‌های استفاده شده در خودرو بادی مدل را نشان می‌دهد.



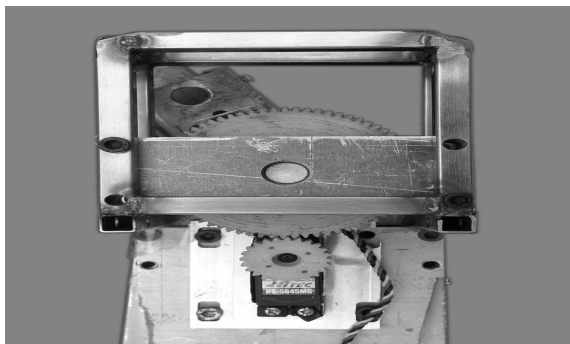
شکل ۱۵. چرخ پلیمری جلو.



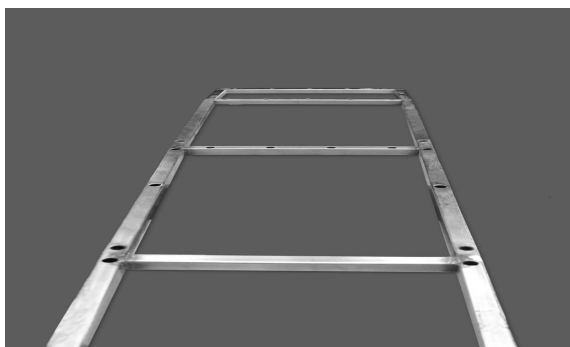
شکل ۱۶. چرخ لاستیکی عقب با تیوب بادی.

## طراحی شاسی

طراحی مناسب شاسی خودرو به منظور تحمل وزن و انتقال نیروهای آیرودینامیکی به چرخ‌ها، حائز اهمیت است. برای طراحی شاسی از پروفیل استیل توخالی استفاده



شکل ۱۷. نمایی از سازوکار سرو موتور و گیربکس برای کنترل فرمان و بال خودرو.



شکل ۱۸. نمایی از شاسی خودرو.

که در آن  $F_{Down}$  نیروی قائم رو به پایین در خودرو بادی است و طبق رابطه‌ی ۲۸ به دست می‌آید:

$$F_{Down} = W + F_{LA} \quad (28)$$

از طرفی نیروی جانبی وارد بر خودرو بادی، تصویر نیروی برآیند آیرودینامیکی ایجاد شده توسط بال خودرو در جهت عرضی خودرو است که از رابطه‌ی ۲۹ به دست می‌آید:

$$F_S = F_L \cos(\beta) + F_D \sin(\beta) \quad (29)$$

این نیرو باعث لغزش جانبی خودرو می‌شود. عدم لغزش هنگامی اتفاق می‌افتد که  $F_f > F_S$  شود. در خودرو بادی مدل، پس از محاسبه‌ی نیروی لغزش جانبی در تمام جهات طبیعی و ظاهری باد و به دست آمدن بیشینه‌ی نیروی لغزشی توسط کد محاسباتی، چرخ‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که اصطکاک ایجادشده توسط آنها از لغزش جانبی در بحرانی‌ترین حالت ممکن جلوگیری کند. اشکال ۱۵ و ۱۶ به ترتیب نمایی از چرخ جلو و عقب خودرو بادی مدل را نشان می‌دهند.

## سازوکارهای کنترلی خودرو

سازوکارهای کنترلی با توجه به این که خودرو بادی از نوع بدون سرنشین است، برای کنترل فرمان و بال مرکزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. کنترل بال خودرو بادی از این لحاظ حائز اهمیت است که در زوایای مختلف حمله، نیروهای برآ و پسای متفاوتی ایجاد می‌کند. بنابراین به منظور کنترل مناسب زاویه‌ی حمله، از سازوکار سرو موتور و گیربکس استفاده شده است. برای کنترل چرخ جلوی خودرو، به منظور هدایت کامل خودرو نیز از سازوکار سرو موتور و گیربکس استفاده شده است. این سرو موتورها توسط

از آنالیز عددی مدل‌های مختلف بدنه و به دست آمدن توزیع سرعت و فشار روی آنها و متعاقباً نیروهای وارد بر آنها، طرح مناسب آیرودینامیکی بدنه‌ی خودرو بادی به دست آمد. شکل ۱۹ نمایی از بدنه‌ی این خودرو را نشان می‌دهد. توزیع سرعت و فشار این بدنه به ترتیب در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده‌اند. نیروی پسای بدنه که در معادلات حرکت خودرو ظاهر می‌شود از رابطه‌ی ۳۵ به دست می‌آید:

$$F_{DB} = \frac{1}{4} \rho V_F^2 C_{DB} A_{PB} \quad (35)$$

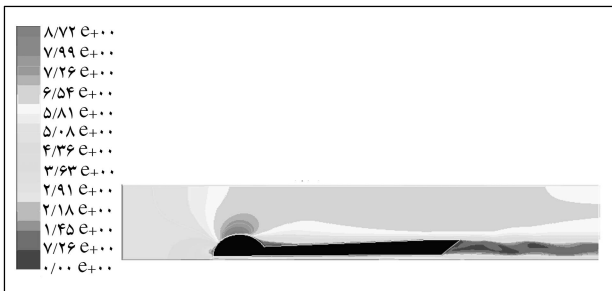
که در آن  $A_{PB}$  کل سطح تصویر شده‌ی بدنه در مقابل جریان هوای مقابل است؛  $C_{DB}$  نیز ضریب پسای بدنه است که با استفاده از تونل باد به دست می‌آید.

### نظریه‌ی حرکت خودروهای بادی

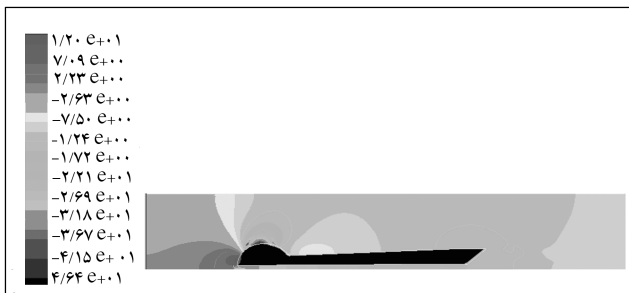
بال خودرو بادی بر اثر وزش باد، نیروی برآ و پسایی تولید می‌کند که می‌تواند با تنظیم مناسب جهت بال به نیروی محرک تبدیل شوند.<sup>[۹]</sup> باد ظاهری که برآیند باد طبیعی و



شکل ۱۹. نمایی از طرح بدنه‌ی خودرو.



شکل ۲۰. پروفیل سرعت بدنه در سرعت باد ۵ متر بر ثانیه.



شکل ۲۱. پروفیل فشار بدنه در سرعت باد ۵ متر بر ثانیه.

شده است. پروفیل مربعی شکل این نوع استیل بر مقاومت خودرو در مقابل پیچش می‌افزاید. برای بیشتر شدن مقاومت کل مجموعه نیز در مقابل خمش و پیچش، از چند قطعه استیل در بین دو استیل اصلی استفاده می‌شود. قطعات به وسیله‌ی جوش آرگون که دقت و مقاومت بسیار بالایی دارد، بهم متصل می‌شوند. شکل ۱۸ نمایی از شاسی طراحی شده برای خودرو را نشان می‌دهد.

### مدل‌سازی و طراحی بدنه

وظیفه‌ی بدنه‌ی خودرو بادی، علاوه بر محافظت از سازوکارهای گردان خودرو، باتری‌ها و موتورها، کاهش نیروی پسای مقاوم خودرو است. با توجه به آیرودینامیک اشکال استاندارد<sup>[۸]</sup>، شکل مخروطی می‌تواند تا حد زیادی نیروی پسا را کاهش دهد. قسمت جلوی بدنه نیز باید برای به تأخیر انداختن جدایش و همچنین محافظت از سازوکار فرمان به شکل یک برآمدگی نیم‌دایره ساخته شود. با در نظر گرفتن این دو اصل، طرح‌های مختلفی برای بدنه به دست آمد. هر یک از این طرح‌ها پس از مدل‌سازی دوبعدی، با استفاده از کد محاسباتی Fluent به منظور به دست آوردن توزیع سرعت و فشار، آنالیز شدند. در این آنالیز از تحلیل غیر لزج که تخمین سریعی از نیروهای اثرگذار بر جسم را ارائه می‌دهد استفاده شد. با استفاده از این تحلیل می‌توان شکل بدنه را برای بهینه‌کردن نیروی بالابر و کم‌کردن نیروی مقاوم با استفاده از توزیع سرعت و فشار، تغییر داد. برای جریان‌های غیر لزج حل معادلات اولر، شامل معادلات بقای جرم و گشتاور، ضروری است. با توجه به سرعت کم خودرو بادی، رژیم جریان در این تحلیل، یک رژیم آرام و پایا در نظر گرفته شد. معادله‌ی بقای جرم یا معادله‌ی پیوستگی چنین است:

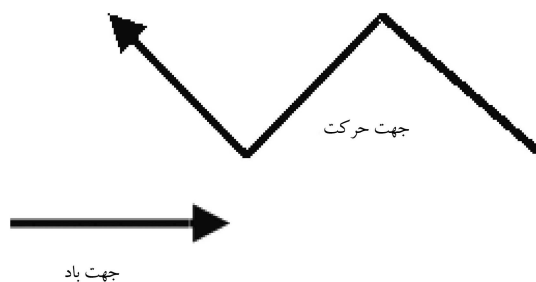
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_i} (\rho u_i) = 0 \quad (33)$$

در این تحلیل عبارت زمانی مساوی صفر در نظر گرفته شده است. معادلات بقای اندازه حرکت نیز به صورت کلی رابطه‌ی ۳۴ بیان می‌شوند:

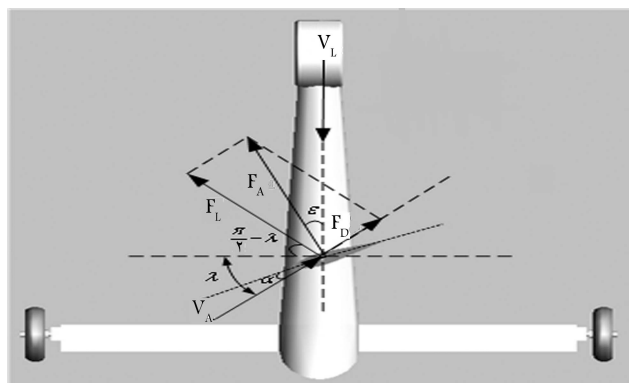
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial X_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_i + F_i \quad (34)$$

که در آن  $p$  فشار استاتیک،  $\rho g_i$  و  $F_i$  به ترتیب نیروهای جسمی جاذبه و جسمی خارجی در جهت  $i$  هستند. در تحلیل دوبعدی بدنه‌ی خودرو بادی، معادله‌ی پیوستگی با معادلات اندازه حرکت که در دو جهت نوشته می‌شوند، به روش حل تفکیکی حل شده‌اند. از آنجا که این معادلات خطی نیستند و پیوسته‌اند، چندین تکرار در حلقه‌ی فرایند حل، قبل از به دست آوردن حل همگرا باید انجام گیرد. چون ممکن است سرعت‌های به دست آمده از حل معادلات اندازه حرکت به‌طور موضعی در معادلات پیوستگی صدق نکنند، از یک معادله‌ی پواسون برای اصلاح فشار استفاده می‌شود. این معادله از معادله‌ی پیوستگی و معادلات خطی شده‌ی اندازه حرکت به دست می‌آید. با حل این معادله‌ی پواسون اصلاحات لازم بر روی مقادیر سرعت و فشار و جریان‌های جرمی به عمل می‌آید و معادله‌ی پیوستگی ارضا می‌شود. کد محاسباتی Fluent با استفاده از روش حجم کنترلی، معادلات حاکم را تبدیل به معادلات جبری می‌کند. این روش شامل بیان معادلات حاکم برای هر یک از حجم‌های کنترلی است، که منجر به معادلات مجزا می‌شود و از این طریق بقای هر کمیت روی حجم کنترل پایه ارضا می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که برای شبکه‌بندی هندسه‌ی دوبعدی بدنه، از شبکه‌های شامل سلول‌های مثلثی غیر ساخت یافته استفاده شده است. این نوع شبکه هزینه‌ی محاسبات را کاهش می‌دهد. پس

و تمایل دارند خودرو در امتداد محور طولی خود حرکت کند. بنابراین هرچه زاویه بین نیروی  $F_A$  و محور طولی خودرو کم تر باشد، تصویر این نیرو در امتداد محور طولی بزرگ تر شده و در نتیجه نیروی محرک بیشتری را موجب می شود. چنان که در شکل ۲۳ نشان داده شده است، حالت حدی حالتی است که در آن زاویه بین  $F_A$  و محور طولی، و به عبارتی  $\varepsilon$ ، به سمت صفر میل کند که در این حالت بیشترین نیروی محرک برای حرکت به وجود می آید. در این حالت زاویه ی باد طبیعی نسبت به محور طولی بزرگ تر از  $90^\circ$  درجه است (شکل ۲۳). از طرفی وقتی باد با زاویه ای بزرگ تر از  $90^\circ$  درجه نسبت به محور طولی خودرو بوزد، نمودار تغییرات نیروهای برآ و پسای بال هنگامی که سرعت خودرو افزایش می یابد، طبق شکل ۲۴ خواهد شد. براساس این شکل با افزایش سرعت خودرو ابتدا نیروی محرک کاهش می یابد تا به صفر برسد و سپس یک روند افزایشی را طی خواهد کرد. بنابراین اگر خودرو حرکت خود را در چنین حالتی (زاویه ی باد طبیعی بزرگ تر از  $90^\circ$  درجه) شروع کند با افزایش سرعت آن، نیروی محرک کاهش یافته و نهایتاً خودرو می ایستد. بنابراین این حالت علی رغم داشتن نیروی محرک بالا در ابتدای حرکت، نقطه ی مناسبی برای شروع حرکت نخواهد بود. اگر باد طبیعی با زاویه ی  $90^\circ$  درجه نسبت به محور طولی بوزد، طبق شکل ۲۵ نیروی برآ که در این حالت منطبق بر محور طولی خودرو خواهد شد، برابر با نیروی محرک می شود. در این حالت با توجه به نمودار تغییرات نیروهای برآ و پسای بال که در شکل ۲۶ نشان داده شده است، هنگامی که سرعت خودرو افزایش می یابد نیروی محرک نیز روند افزایشی را طی می کند. بدین ترتیب این حالت مناسب ترین حالت برای شروع حرکت است که در آن کل نیروی برای ایجاد شده توسط بال به نیروی محرک تبدیل می شود.



شکل ۲۲. شماتیک نحوه ی حرکت خودرو در خلاف جهت باد.



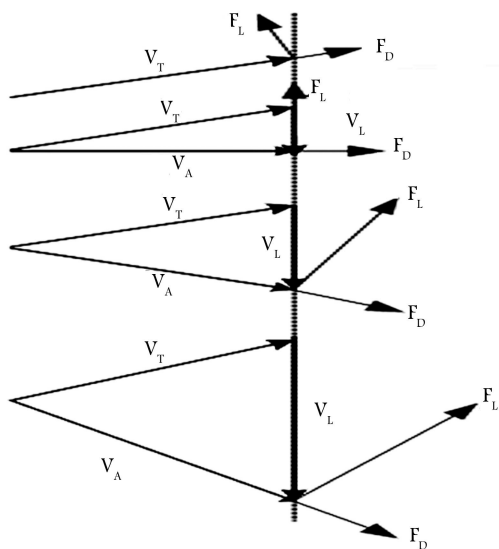
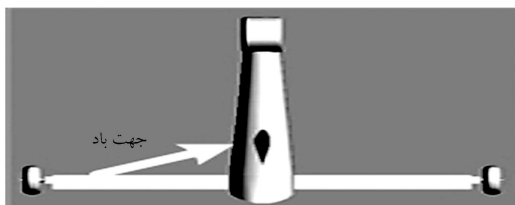
شکل ۲۳. نمایی از وضعیت نیروهای بال در نقطه ی شروع حرکت برای زاویه ی باد طبیعی بزرگ تر از  $90^\circ$  درجه.

باد ایجاد شده به واسطه ی حرکت خودرو است، عامل اصلی ایجاد نیروی محرک و در نتیجه حرکت خودرو است. پس از شروع حرکت، با افزایش سرعت خودرو با فرض این که سرعت باد طبیعی ثابت باشد، سرعت باد ظاهری نیز افزایش یافته و همین امر موجب شتاب گرفتن خودرو می شود. مطابق شکل ۲ با افزایش سرعت خودرو و در نتیجه افزایش سرعت باد ظاهری، زاویه ی بردار سرعت این باد با محور طولی خودرو ( $\beta$ ) کاهش می یابد. حال اگر زاویه ی خط وتر بال با محور طولی خودرو با  $\theta$  نشان داده شود، زاویه ی حمله ی بال از رابطه ی ۳۶ به دست خواهد آمد:

$$\alpha = \beta - \theta \quad (36)$$

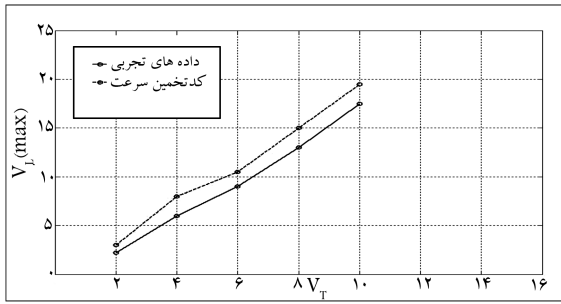
با تغییر زاویه ی  $\beta$ ، زاویه ی حمله نیز تغییر می یابد. در این حالت بال خودرو برای قرار گرفتن در بازه کارکرد خود و نزدیک به نقطه ی واماندگی به منظور ایجاد نیروی برآی بیشتر، باید به طور مناسب تنظیم شود. با افزایش سرعت خودرو، بردار سرعت باد ظاهری به سمت محور طولی خودرو متمایل تر می شود و به دلیل عمود بودن بردار نیروی برآ بر بردار سرعت باد ظاهری، درصد کمتری از این نیرو به نیروی محرک تبدیل شده و قسمت اعظم آن به نیروی جانبی تبدیل می شود. این مسئله ضمن آن که سرعت خودرو را کاهش می دهد باعث می شود که حرکت خودرو در خلاف جهت باد تقریباً غیرممکن شود. بنابراین برای حرکت در خلاف جهت باد از شیوه ی حرکت زیگزاگی استفاده می شود (شکل ۲۲).<sup>[۱۰]</sup> هرچند جهت حرکت دقیقاً خلاف جهت حرکت باد نیست ولی با تغییر زاویه ی حمله ی بال، می توان در نهایت در خلاف جهت باد حرکت کرد.

یکی از نکات اساسی در حرکت خودروهای بادی، تعیین زاویه ی باد طبیعی مناسب برای شروع حرکت است. برآیند نیروهای برآ و پسای بال ( $F_A$ ) تمایل دارد خودرو را در جهت خود حرکت دهد، ولی اصطکاک چرخ ها مانع از این امر شده



شکل ۲۴. نمودار نیروهای برآ و پسای بال برای زاویه باد طبیعی بزرگ تر از  $90^\circ$  درجه.





شکل ۲۷. بیشینه سرعت خودرو در سرعت‌های مختلف باد طبیعی.

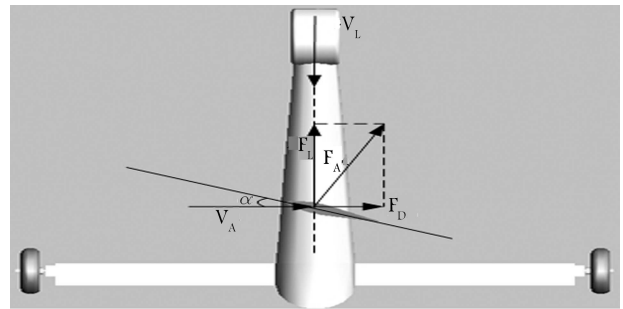
جدول ۲. مشخصات خودروی بادی مدل.

وزن کل (W)	۱۲/۵ کیلوگرم
ارتفاع بال (SPAN)	۱٫۲ متر
سطح بال	۰٫۶ متر مربع
زاویه‌ی واماندگی بال (Stall)	۱۲ درجه
ضریب پسای بدنه ( $C_{DB}$ )	۰٫۷
قطر چرخ جلو ( $Di_f$ )	۰٫۱ متر
قطر چرخ‌های عقب ( $Di_r$ )	۰٫۲ متر
فاصله‌ی افقی بین چرخ‌های عقب (Track)	۱٫۱ متر
فاصله‌ی چرخ جلو تا محور چرخ‌های عقب (Wheelbase)	۱٫۳۷۵ متر
ضریب اصطکاک دینامیکی چرخ‌ها ( $\mu$ )	۰٫۷۵
طول خط وتر ایرفویل اکسل عقب ( $C_{beam}$ )	۰٫۱ متر
ضخامت ایرفویل اکسل عقب ( $T_{beam}$ )	۰٫۱۲ متر

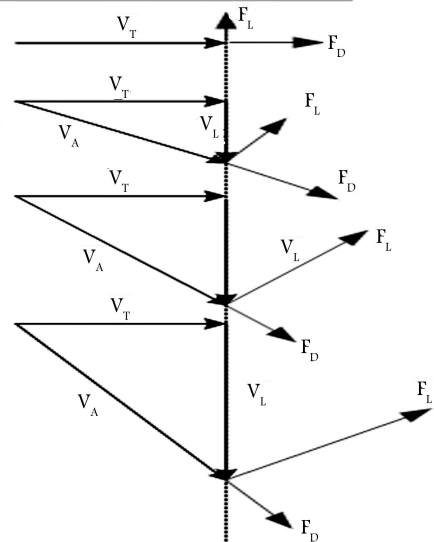
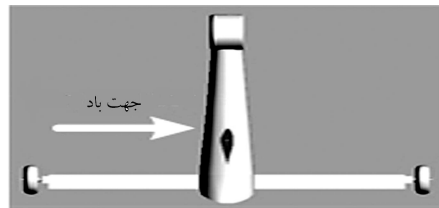
شد، و در نتیجه سرعت دورانی چرخ مشخص می‌شود. با ضرب سرعت دورانی چرخ در شعاع چرخ می‌توان سرعت خطی چرخ و در نهایت خودرو را محاسبه کرد. شکل ۲۷ نشان‌گر بیشینه‌ی سرعت خودرو بادی با مشخصات ذکر شده در جدول ۲، در سرعت‌های مختلف باد طبیعی براساس داده‌های آزمایش و داده‌های حاصل از کد محاسباتی آنالیز حرکت خودرو بادی<sup>[۱]</sup> است. براساس این داده‌ها مشخص می‌شود که با افزایش سرعت باد طبیعی سرعت خودرو نیز افزایش می‌یابد. همچنین به‌ازای سرعت باد طبیعی  $10\text{ m/s}$ ، سرعت خودرو  $17.75$  برابر سرعت باد می‌شود. این سرعت در مقایسه با خودروهای بادبانی هم‌سایز با بادبان غیرصلب که تاکنون در دنیا ساخته شده‌اند، رکورد بسیار بالایی است.<sup>[۱]</sup>

### نتیجه‌گیری

نوشتار حاضر چکیده‌ای از طراحی دقیق، کنترل، و آزمایش یک مدل خودرو بادی ایرفویلی را ارائه می‌دهد. براساس نتایج حاصل از نظریه‌ها و آزمایشات، بیشینه‌ی سرعت خودرو در سرعت باد طبیعی ثابت، با فرض ثابت بودن زاویه‌ی باد ظاهری، در زاویه‌ی باد طبیعی  $\phi = \frac{\pi}{4} + \beta$  به دست می‌آید. تحت همین شرایط بیشینه‌ی سرعت باد ظاهری نیز که بر مقدار نیروی محرک تأثیرگذار است، در زاویه‌ی باد طبیعی  $\phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2}$  به دست می‌آید. نهایتاً سرعت خودرو در شرایطی که سرعت باد طبیعی  $10\text{ m/s}$  باشد، به  $17.75\text{ m/s}$  خواهد رسید که در مقایسه با خودروهای بادبانی هم‌سایز با بادبان غیرصلب که تاکنون در دنیا ساخته شده‌اند، رکورد بسیار بالایی است.



شکل ۲۵. نمایی از وضعیت نیروهای بال در نقطه‌ی شروع حرکت برای زاویه‌ی باد طبیعی برابر با  $90^\circ$  درجه.



شکل ۲۶. نمودار نیروهای برآ و پسای بال برای زاویه‌ی باد طبیعی برابر با  $90^\circ$  درجه.

### آزمایش خودرو بادی مدل

خودرو بادی ایرفویلی برای نخستین بار در کشور براساس نظریه‌ها و آنالیزهای مهندسی، طراحی و ساخته شده است. حرکت این خودرو در شرایط مختلف، کاملاً با موفقیت انجام گرفته است. چنان که پیش‌تر نیز اشاره شد، عملکرد بالا در یک خودرو بادی رسیدن به سرعت مطلق و سرعت نسبی بالا نسبت به سرعت باد طبیعی است. به‌دلیل آنکه هدف این نوشتار بیان چگونگی طراحی و کنترل خودرو است، اندازه‌گیری سرعت خودرو به‌منظور تعیین عملکرد آن به‌عنوان آزمایشی جهت صحه‌گذاری بر طراحی انجام شده است. برای سنجش سرعت خودرو، از دوربین دیجیتال استفاده می‌شود. نحوه‌ی عملکرد این دوربین به این ترتیب است که حس‌گر دوربین باید روبه‌روی یک آهن‌ربا و در شعاع مشخصی از چرخ خودرو نصب شود. هر بار که حس‌گر از مقابل آهن‌ربا می‌گذرد، به‌دلیل القای میدان مغناطیسی آهن‌ربا یک جریان الکتریکی در حس‌گر تولید می‌شود که توسط یک برد الکتریکی دریافت خواهد

## فهرست علائم

$F_{LA}$ : نیروی برای اکسل عقب خودرو	$\varphi$ : زاویه‌ی بین بردار سرعت باد طبیعی و بردار سرعت خودرو
$F_{DA}$ : نیروی پسای اکسل عقب خودرو	$\beta$ : زاویه‌ی بین بردار سرعت باد ظاهری و بردار سرعت خودرو
$\mu$ : ضریب اصطکاک دینامیکی چرخ‌ها	$\alpha$ : زاویه‌ی حمله بال
$W$ : وزن کل خودرو	$\theta$ : زاویه‌ی بین خط وتر بال و محور طولی خودرو
$B$ : عرض خودرو	$V_T$ : سرعت باد طبیعی
$A$ : طول خودرو	$V_L$ : سرعت ایجاد شده به واسطه‌ی حرکت طولی خودرو
$X$ : فاصله‌ی مرکز ثقل از محور اکسل عقب	$V_A$ : سرعت باد ظاهری
$T$ : گشتاور وارده به دنده‌های چرخ‌دنده	$F_A$ : نیروی برآیند آیرودینامیکی وارد بر بال
$b_G$ : ضریب اطمینان	$F_T$ : نیروی محرک خودرو
$N$ : تعداد دنده‌ها	$F_S$ : نیروی جانبی وارده بر خودرو از طرف بال
$m$ : مدول چرخ‌دنده	$R_D$ : نیروی مقاوم کل وارد بر خودرو
$z$ : ضریب تجربی قابل حصول از جداول	$F_L$ : نیروی برای بال
$k_v$ : ضریب تجربی قابل حصول از جداول	$F_D$ : نیروی پسای بال
$I$ : تابعی از زاویه‌ی فشار چرخ‌دنده‌ها و نسبت تبدیل	$F_{DB}$ : نیروی پسای بدنه
$C_p$ : ضریب کشسانی	
$\omega$ : تعداد دورها	

## پانویس

1. pitch
2. yaw

## منابع

1. Khayyat, M. and Rad, M., "Land Yacht Aerodynamic Performance", *Proceeding of the 13th Annual International Conference on Mechanical Engineering*, ISME 2005, Isfahan, Iran, 17-19 (May, 2005).
2. Eppler, Richard. "Airfoil design and data", Springer-Verlag (Berlin), (1990).
3. Marchaj, C.A. "Sailing theory and practice", Adlard Coles Limited, London, (1907).
4. Richards, P.J.; Johnson, A. and Stanton, A. "America's cup downwind sails-vertical wings or horizontal parachutes?", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **89**, pp. 1565-1577, (2001).
5. Torres, G.E. and Mueller, T.J. "Low-aspect-ratio wing aerodynamics at low reynolds numbers", *AIAA Journal*, **42**(11), pp. 865-873, (2004).
6. Harry, J.G.; Bullivant, W.K. "Tests of NACA 0009, 0012, and 0018 airfoils in the full-scale tunnel", *naca-report-647*, (1939).
7. Dudley, D.W. "Handbook of practical gear design", CRC Press, (1994).
8. Hucho, W.H. "Aerodynamics of road vehicles", Butterworth, Boston, (1986).
9. Yoo, Jaehoon; Hyoung Tae Kim. "Computational and experimental study on performance of sails of a yacht", *Ocean Engineering*, **33**, pp. 1322-1342, (2006).
10. Stephens, O.J. "Guides to the approximation of sailing yacht performance", 9th CSYS SNAME, (1989).
11. "NALS NEWS FLASH-new landsailing speed record" ivanpah dry lake, primm, (March 15, 2005).