نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME

ISSN: 1605-9719
DOI: 10.30506/MMEP.2022.535692.1938

بررسی روش‌های بهبود آیرودینامیک خودروها از طریق کنترل جریان انفعالی

سعید باعصمت
دانشجوی کارشناسی ارشد

محمود پسندیده فرد*
استاد،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشکده مهندسی،
دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

چکیده: بهبود عملکرد آیرودینامیکی وسایل نقلیه به علت تاثیر بر مصرف سوخت، پایداری و کنترل پذیری خودروها همواره مورد توجه مهندسان بوده است. در این پژوهش جهت دستیابی به دیدگاه اجمالی از تاثیرگذاری روش‌های بهبود عملکرد آیرودینامیکی خودروها، مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه کاهش نیروهای آیرودینامیکی با استفاده از روش کنترل جریان انفعالی صورت گرفته است که می‌تواند در بررسی، پیاده سازی و انتخاب روش مناسب تاثیرگذار باشد. نتایج حاصل نشان دهنده اهمیت بالای طراحی بدنه خودرو در کاهش نیروی پسا و نیروی برآ است به طوری که ایجاد کانال و انحنا در طرفین خودرو جهت انتقال جریان هوا از نواحی فشار بالا در جلوی بدنه به نواحی فشار پایین در پشت بدنه بیشترین میزان کاهش نیروی پسا را در پی دارد. همچنین استفاده از اسپویلر در انتهای بدنه به جهت تاخیر در جدایش و هدایت جریان هوا به سمت بالا، موجب کاهش نیروی برآ می‌گردد. تاثیر این روش‌ها بر کاهش نیروهای آیرودینامیکی بیش از سایر مکانیزم ها است، اما میزان دقیق تاثیرگذاری هر روش به نوع خودرو و نحوه پیاده‌سازی آن بر روی بدنه بستگی دارد.

واژه های راهنما: آیرودینامیک، خودرو، نیروی پسا، نیروی برآ، کنترل جریان انفعالی.

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۸
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

Investigating methods to improve vehicle aerodynamics by passive flow control

Saeed Baesmat
M.Sc Student

Mahmoud Pasandidehfard*
Professor, , Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

Abstract: Improving the aerodynamic performance of vehicles due to the impact on fuel consumption, stability and controllability of vehicles has always been on the attention of engineers. In this study, in order to obtain a brief view of the effectiveness of methods to improve the aerodynamic performance of vehicles, a review of research conducted to reduce aerodynamic forces using the passive flow control method, which can be effective in consideration, implementation and selection of the proper method. The results show the high importance of car body design in reducing drag and lift such that implementing the channel and curvature on the sides of the car to transfer air flow from high pressure areas in front of the body to low pressure areas behind the body has the highest value of reduction in drag force. Also, using a spoiler at the end of the body to delay separation and to direct airflow upwards reduces the lifting force. The effect of these methods on reducing aerodynamic forces is more than other mechanisms, but the exact extent of the effectiveness of each method depends on the type of vehicle and the way of its implementation on the body.

Keywords: Aerodynamics, vehicle, drag force, lift force, passive flow control.

* نویسنده مسئول، fard_m@um.ac.ir

۱- مقدمه

علم آیرودینامیک به بررسی عبور جریان از روی یک جسم و اثرات ناشی از آن می‌پردازد. در صنعت حمل و نقل جهانی، توسعه‌ی آیرودینامیک وسایل نقلیه مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است زیرا می‌تواند در کاهش مصرف سوخت، افزایش سرعت، شتاب و کنترل‌پذیری آن‌ها نقش بسزایی ایفا کند. پژوهش‌های انجام شده در این زمینه به سه روش تئوری، عددی و تجربی نیروهای آیرودینامیکی ناشی از عبور جریان هوا بر خودروها که شامل نیروی پسا و نیروی برآ می‌باشد را مورد بررسی قرار داده‌اند[۱].

نیروی پسا به دو نوع فشاری و اصطکاکی تقسیم بندی می‌شود که سهم نیروی فشاری ۸۰٪ از کل نیروی پسا می‌باشد. این نیرو به دلیل جدایش جریان عبوری در عقب خودرو و اختلاف فشار هوای اطراف بدنه در قسمت پیشانی و پشت خودرو هنگام عبور جریان هوا از روی سطح آن به وجود می‌آید. نیروی اصطکاکی نیز به علت اصطکاک جریان مجاور بدنه که ناشی از زبری سطح می‌باشد تولید می‌گردد. [۲]

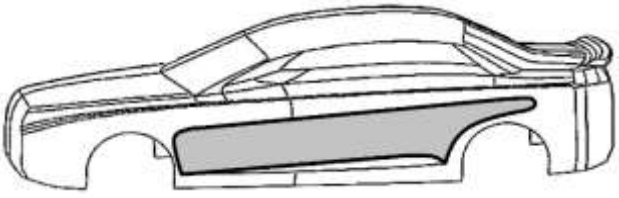
عوامل موثر در نیروی پسا شامل شکل کلی بدنه، چرخ‌ها و جزئیات طراحی سطح خودرو می‌باشد که سهم هر کدام به ترتیب ۴۵٪، ۳۰٪ و ۲۵٪ از کل این نیرو است. از جمله راه‌های بهبود عملکرد آیرودینامیکی خودروها، کاهش نیروی پسای فشاری می‌باشد که با استفاده از کاهش فشار وارده توسط جریان هوا به قسمت جلوی خودرو، کاهش گردابه‌های ناشی از جدایش جریان در قسمت عقب و یا از بین بردن نیروی پسای تجهیزات بکار رفته در زیر بدنه خودرو میسر می‌شود. تاکنون تمرکز پژوهش‌های صورت گرفته بر روی تغییر هندسه و طراحی بهینه بدنه خودرو بوده است. [۳]

به طور کلی کاهش نیروی پسا در وسایل نقلیه به دو روش کنترل جریان فعال[1] و کنترل جریان انفعالی[2] صورت می‌پذیرد. در روش کنترل جریان فعال، سیستم‌ها یا محرک‌هایی که برای کاهش نیروی پسا نیاز به برق یا انرژی خودرو دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد که برای نمونه می‌توان به مکش جریان هوا از نواحی فشار بالا و دمیدن جریان به نواحی فشار پایین در اطراف خودرو اشاره نمود. در روش کنترل جریان انفعالی، تغییر در طراحی بدنه خودرو یا اتصال دستگاه‌هایی که موجب تغییر در مسیر حرکت جریان عبوری از سطح می‌شوند و برای فعالیت نیازی به انرژی ندارند، مورد توجه قرار گرفته است که برای مثال می‌توان به استفاده از اسپویلر[3] و ایجاد کانال در بدنه خودرو برای انتقال جریان هوا اشاره کرد[۲].

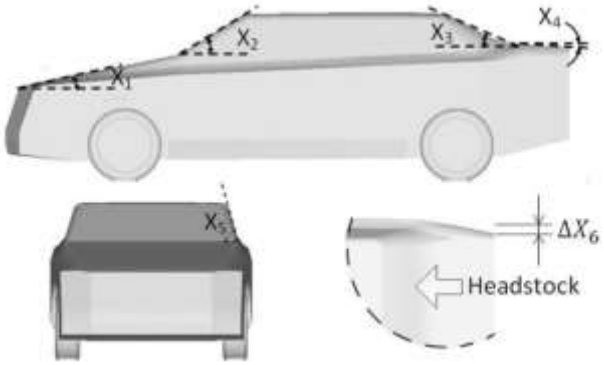
در پژوهش حاضر مروری بر تحقیقات صورت گرفته در زمینه کاهش نیروی پسا در مدل‌های مختلف خودرو از جمله سواری، اسپرت، شاسی بلند[4] و هاچبک با استفاده از کنترل جریان انفعالی و تاثیر هر سیستم کاهش پسا بر انواع خودروها انجام شده است.

۲- انتقال جریان هوای اطراف بدنه

جریان هوا را می‌توان به روش‌های مختلف از نواحی فشار بالا در اطراف خودرو به نقاط فشار پایین منتقل کرد که برخی از آن‌ها عبارتند از ایجاد انحنا و تغییر زاویه در بدنه، بکارگیری پرده هوایی[5] در سپر جلو، طراحی کانال انتقال هوا بر روی بدنه و استفاده از دیفیوزر[6] در زیر بدنه خودرو. در شکل ۱ تا ۴ نمونه‌ای از مکانیزم‌های انتقال جریان هوا در یک طراف خودرو نشان داده شده است:

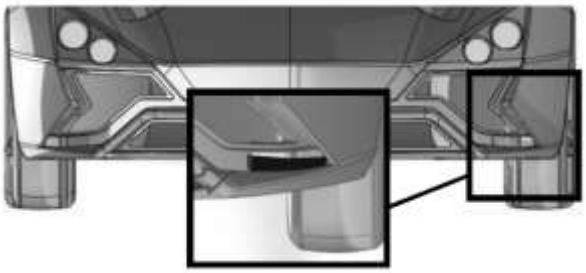


شکل ۱ انحنا و تورفتگی در طرفین بدنه [۱]



شکل ۲ تغییر زاویه در قسمت‌های مختلف بدنه [۴]

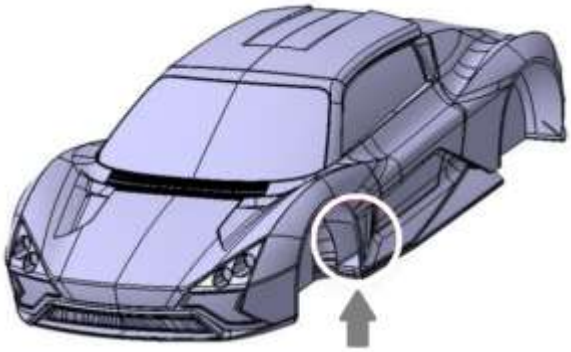
[1] Active flow control
[2] Passive flow control
[3] Spoiler
[4] SUV
[5] Air curtain
[6] Diffuser



شکل ۳ محل قرارگیری پرده هوایی در خودرو [۵]

شکل ۴ جانمایی دیفیوزر در زیر بدنه [۶]

دیکسون و همکاران [۵] در سال ۲۰۲۰ به بررسی عملکرد آیرودینامیکی یک خودروی اسپرت با اعمال تغییراتی در بدنه جهت کنترل جریان انفعالی در سه بخش توسعه آیرودینامیک جلو، توسعه آیرودینامیک میانی و توسعه آیرودینامیک عقب خودرو پرداختند. به طور کلی این تحقیق نشان داد بهترین حالت به منظور کاهش نیروهای آیرودینامیکی در هنگام توسعه آیرودینامیک میانی است به طوری که با بکارگیری کانال جانبی انتقال هوا در پشت چرخ‌های جلو به منظور انتقال جریان از جلوی بدنه به عقب و همچنین تعبیه یک دریچه در ناحیه ورودی چرخ‌های عقب به علت جلوگیری از افزایش فشار در اطراف چرخ-ها، مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات اعمال شده موجب کاهش ضریب پسا به میزان ۷/۳٪ شد در حالی که بیشترین تاثیر آن بر ضریب برآ با ۳۳/۵٪ کاهش همراه بود. از طرفی اثرات استفاده از پره در دهانه کانال انتقال هوا مورد مطالعه قرار گرفت که به علت چرخش جریان در بین پره‌ها و ایجاد نیروی پسا، نتایج قابل قبولی در بر نداشت. همچنین در بخش توسعه آیرودینامیک جلو، تاثیر قرار دادن پرده هوایی در زیر چراغ‌های جلو و انتقال جریان هوای فشار بالا به پشت سپر همراه با تغییر محل قرارگیری پلاک نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل در این بخش نشان دهنده کاهش ضریب پسا به میزان ۱/۹٪ و کاهش ضریب برآ به میزان ۶/۸٪ می‌باشد که هر دو مطلوب است. شکل ۵ کانال جانبی انتقال جریان هوا را در مدل مورد مطالعه نشان می‌دهد:



شکل ۵ کانال انتقال جریان اطراف چرخ‌های جلو [۵]

خالصی‌دوست و سیف‌زاده [۳] بر روی تاثیر بکارگیری کانال انتقال هوا در خودروهای شاسی بلند و همچنین پوشاندن تجهیزات زیر بدنه تحقیق کردند. در این پژوهش ایجاد کانال انتقال هوا به گونه‌ای انجام شد که جریان از سطح زیر بدنه در قسمت عقب به پشت خودرو انتقال یابد. این تغییرات به دلیل کاهش گردابه‌ها و افزایش فشار در ناحیه کم فشار پشت خودرو و همچنین از بین رفتن نیروی پسا ناشی از تجهیزات زیر بدنه، موجب کاهش ضریب پسا به میزان ۲۳٪ گردید که مقدار قابل توجهی است.

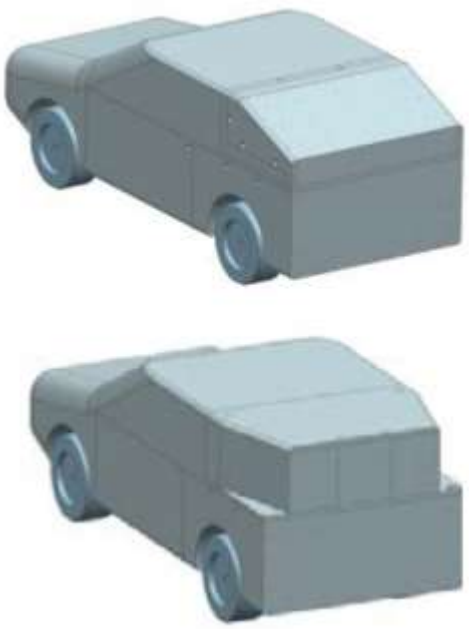
بهروان و مهدی [۱] اثرات ایجاد انحنا در بدنه یک خودروی سدان بر نیروهای آیرودینامیکی را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور با ایجاد فرورفتگی در سطح کناری بدنه و درب‌ها، جریان هوای اطراف خودرو از کناره‌های بدنه به پشت آن منتقل گردید. به همین دلیل فشار ناحیه ویک[1] پشت خودرو افزایش و در پی آن به علت کاهش اختلاف فشار جلو و عقب خودرو، ضریب پسا به میزان ۲۰/۵٪ به طور چشمگیری کاهش یافت. اما بر خلاف اثرگذاری مثبت بر روی نیروی پسا، ضریب برآ به میزان ۲۹/۶٪ با افزایش روبرو شد. همچنین نمودار تغییرات ضریب فشار در عرض خودرو در قسمت عقب نشان دهنده افزایش فشار در مرکز بدنه به علت انتقال جریان هوا به این محدوده می‌باشد.

هو و همکاران [۴] با ایجاد تغییر در بدنه و مسیر انتقال جریان هوا از جلو به عقب خودرو نشان دادند گردابه‌های جداکننده جریان از سطح بدنه تاثیر بسزایی بر نیروی پسا داشت به گونه‌ای که انتقال آرام جریان از پیشانی به پشت بدنه می‌تواند به کاهش ضریب پسا کمک نماید. نتایج حاصل از شش تغییر : زاویه‌های کاپوت، شیشه جلو، شیشه عقب، درب صندوق عقب، شیشه‌های کناری و جمع‌شدگی عقب خودرو نشان از آن دارد که مهم‌ترین عامل کاهش ضریب پسا، افزایش زاویه کاپوت و

[1] Wake

موثرترین عامل بر ضریب برآ، زاویه صندوق عقب می‌باشد. علاوه بر موارد بیان شده، جمع شدن عقب بدنه، زاویه درب صندوق عقب و شیشه جلو به ترتیب بیشترین نقش را در تغییرات ضریب پسا دارا هستند. همچنین جمع شدن عقب بدنه، زاویه کاپوت و زاویه شیشه عقب تاثیرگذارترین عوامل بر ضریب برآ بودند.

ژیان و فنگ [۷] به مطالعه اثرات تغییر زاویه در نقاط مختلف بدنه یک مدل خودروی سدان پرداختند. کاهش زاویه انتهای سقف نسبت به افق (ایجاد شیب در سقف به سمت عقب بدنه) موجب کاهش ضریب پسا به میزان ۶٪ نسبت به حالت بدون زاویه می‌شود که دلیل آن کاهش انرژی جنبشی جریان در مجاورت سقف و تاخیر در جدایش می‌باشد. از طرفی افزایش این زاویه (ایجاد شیب در سقف به سمت جلوی بدنه) نیز موجب کاهش ضریب پسا گردید، اما مقدار تغییرات ایجاد شده کمتر از حالت کاهش این زاویه بود. همچنین اثبات شد طول صندوق عقب هر چه بیشتر باشد، ضریب پسا کمتر می‌شود. از طرفی مشاهده گردید افزایش زاویه انتهای زیر بدنه نسبت به راستای افق و افزایش زاویه انتهای صندوق عقب نسبت به راستای عمود تاثیر مستقیم بر کاهش ضریب پسا دارد.



شکل ۶ انحنا در انتهای بدنه [۸]

در شکل ۶ پژوهش وارنی و همکاران [۸] نشان داده شده است که انتقال جریان هوا از سقف و طرفین بدنه به پشت یک مدل خودروی شاسی بلند از طریق ایجاد تورفتگی در انتهای بدنه و کاهش سطح مقطع عقب خودرو به منظور انتقال جریان از طرفین و سقف به پشت خودرو و افزایش فشار در ناحیه ویک بررسی نمودند. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که انتقال جریان از سقف خودرو، اثرگذاری بیشتری بر نیروهای آیرودینامیکی داشت به طوری که با تغییر زاویه ۱۰ درجه‌ای در انتهای سقف، ضریب پسا به میزان ۰/۰۳۴ کاهش و ضریب برآ به میزان ۰/۱۹ افزایش یافت که دلیل تاثیر بالا بر نیروی برآ تغییر فشار در راستای عمود می‌باشد. همچنین انتقال جریان هوا از طرفین بدنه به پشت خودرو با ایجاد تورفتگی به زاویه ۱۵ درجه نسبت به حالت اولیه باعث کاهش ضریب پسا به میزان ۰/۰۲۵ و افزایش ضریب برآ به میزان ۰/۰۸ گردید. با اضافه نمودن صفحات هدایت کننده جریان، افزایش ضریب پسا و کاهش ضریب برآ در مدل‌های توسعه یافته از دیگر نتایج پژوهش مذکور بود.

جو و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۸ پژوهشی در سه بخش توسعه آیرودینامیک جلو، عقب و بهینه‌سازی جامع بر روی یک خودروی هاچبک نشان دادند که اصلاح در بخش‌های مذکور موجب کاهش ضریب پسا به ترتیب به میزان ۵/۶۴٪، ۷/۲۱٪ و ۱۰/۳۴٪ شد. بخش بهینه‌سازی جلوی خودرو شامل کاهش زاویه کاپوت و شیشه جلو و افزایش زاویه دماغه زیر بدنه بود که به منظور کاهش فشار در پیشانی و انتقال سریع جریان از جلو به سقف خودرو طراحی شد. در بخش بهینه‌سازی عقب خودرو با کاهش زاویه انتهای سقف و شیشه عقب و افزایش زاویه انتهای زیر بدنه جریان هوای اطراف به پشت خودرو منتقل گردید که این عامل باعث افزایش فشار در ناحیه ویک شد. بهینه‌سازی جامع مدل مورد مطالعه نیز علاوه بر تغییرات فوق شامل کاهش زاویه طرفین انتهای بدنه گردید.

هیرست و همکاران [۱۰] با بررسی اثرات انتقال جریان از اطراف یک بدنه پهن (بلوف[1]) به پشت آن با ایجاد شکاف و قرار دادن صفحات هدایت کننده جریان به این نتیجه دست یافتند که ضریب پسا در پی اعمال این تغییر به میزان ۱۵٪ کاهش یافت. دلیل این امر چسبندگی بیشتر جریان به سطح، تاخیر در جدایش، کاهش قابل توجه گردابه‌های پشت بدنه و افزایش فشار ناحیه ویک می‌باشد.

حسن و همکاران [۱۱] تاثیر انتقال جریان از زیر بدنه به پشت خودرو که محدوده کم فشار می‌باشد را مطالعه نمودند. تحقیق آن‌ها شامل تغییر زاویه انتهای زیر بدنه به منظور تاخیر در جدایش و انتقال مناسب جریان با زوایای مختلف بود که نتایج حاصل نشان از کاهش نیروی پسا با افزایش زاویه در انتهای زیر

[1] Bluff body

بدنه دارد. همچنین در بهترین زاویه بررسی شده در پژوهش مذکور یعنی ۱۲/۵ درجه، نیروی پسا ۲۲/۱۳ ٪ کاهش یافت در حالی که هنگام استفاده از دیفیوزر با همین زاویه تنها ۹/۵ ٪ کاهش نیوری پسا مشاهده گردید که نشان دهنده تاثیر مناسب کاهش زاویه انتهای زیر بدنه به علت چسبندگی جریان به سطح، انتقال آن به پشت خودرو و کاهش ناحیه ویک می‌باشد. شکل ۷ نشان دهنده محل اعمال تغییرات بدنه و اضافه نمودن دیفیوزر است:

شکل ۷ انحنا و دیفیوزر زیر بدنه [۱۱]

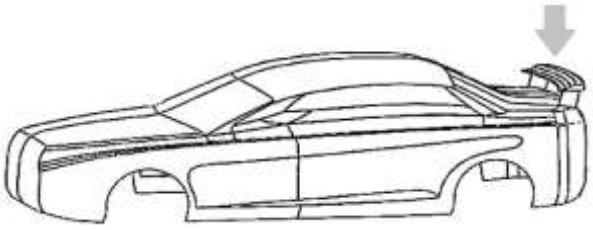
صالح و علی [۱۲] به روش عددی کاهش نیروی پسا در یک مدل خودروی سدان را مورد مطالعه قرار دادند. یکی از راه‌های کاهش نیروی پسا که در تحقیق مذکور بررسی شد استفاده از دیفیوزر در انتهای زیر بدنه بود که نتایج حاصل از آن نشان دهنده کاهش ضریب پسا به میزان ۲/۵٪ به دلیل انتقال جریان از زیر بدنه به پشت خودرو و کاهش گردابه‌ها بود.

روحانی [۱۳] در سال ۱۳۹۷ اثرات استفاده از دیفیوزر بر روی دو مدل خودروهای هاچبک و صندوق‌دار را مورد مطالعه قرار داد. نتایج حاصل نشان دهنده کاهش ضریب برآ هنگام اضافه نمودن دیفیوزر زیربدنه به خودروی صندوق‌دار به میزان ٪۹۹ بود. در حالی که این برای خودروی هاچبک موجب ۶۵٪ کاهش گردید. همچنین ضریب پسا با کاهشی به میزان ۳٪ تا ٪۴ مواجه شد که نشان دهنده تاثیرگذاری اندک دیفیوز بر نیروی پسا بود.

در سال ۲۰۲۱ ناث و همکاران [۶] به بررسی تاثیر اتصال دیفیوزر در زیر بدنه عقب یک مدل خودروی اسپرت پرداختند. این بهینه‌سازی با انتقال سریع‌تر جریان از زیر بدنه به پشت خودرو، باعث افزایش فشار در ناحیه ویک گردید. علاوه بر آن تفکیک جریان و افزایش سطح تماس بدنه و جریان هوا باعث تاخیر در جدایش و کاهش گردابه‌های پشت خودرو، از دیگر نتایج این تحقیق بود که با کاهش ضریب پسا به میزان ۲/۸٪ و کاهش ضریب برآ به میزان ۴/۲٪ عملکرد مناسب این سیستم را نشان داد.

۳- اسپویلر و بال[1]

استفاده از اسپویلر بر روی صندوق عقب از جمله راه‌های توسعه آیرودینامیک خودروها محسوب می‌شود که در شکل ۸ نحوه قرارگیری آن بر روی بدنه مشاهده می‌شود:



شکل ۸ اسپویلر بکار رفته در عقب خودرو [۱]

بهروان و مهدی [۱] تاثیر بکارگیری اسپویلر در خودروهای سدان را مورد بررسی قرار دادند که نتایج حاصل نشان دهنده کاهش ضریب پسا به میزان ۸/۳٪ و کاهش ضریب برآ به میزان ۶/۳٪ می‌باشد. اسپویلر با انتقال بخشی از جریان به پشت خودرو باعث افزایش فشار در ناحیه ویک و با هدایت بخش دیگری از جریان به سمت بالا موجب ایجاد نیروی برآی منفی می‌گردد. در پژوهش مذکور اثرات افزایش ارتفاع اسپویلر از سطح بدنه بر نیروهای آیرودینامیکی نیز مورد تحقیق قرار گرفت که با افزایش ارتفاع اسپویلر ضریب پسا کاهش و ضریب برآ افزایش یافت. لازم به ذکر است با اینکه افزایش ارتفاع اسپویلر موجب افزایش نیروی برآ گردید اما مقدار این نیروی برآ نسبت به حالت بدون اسپویلر خودرو کمتر است و این نشان دهنده تاثیر مثبت استفاده از اسپویلر در هر ارتفاعی می‌باشد.

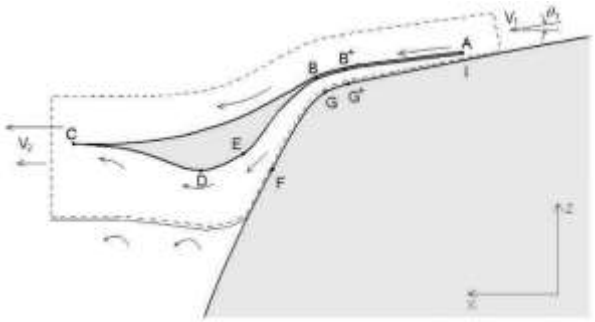
روحانی [۱۳] در پژوهشی جامع تاثیر استفاده از اسپویلر بر روی خودروهای هاچبک و صندوق‌دار را مورد مطالعه قرار داد. افزودن اسپویلر به انتهای خودروی هاچبک و صندوق‌دار موجب کاهش ضریب برآ به ترتیب به میزان ۹۱٪ و ۱۰۰٪ شد. در بررسی ضریب پسا نیز کاهش اندکی به میزان ۲٪ تا ۵٪ برای هر دو مدل را نشان داد. همچنین استفاده از دو اسپویلر به طور همزمان نیز بر روی مدل‌های مورد بررسی مطالعه گردید که برای خودروی هاچبک باعث کاهش ضریب پسا و افزایش ضریب برآ به اندازه ۴٪ و ۷۶٪ شد در حالی که برای خودروی صندوق‌دار موجب افزایش ضریب پسا و کاهش ضریب برآ به اندازه ۱٪ و ۹۹٪ گردید. نتایج حاصل نشان از رفتار متفاوت بکارگیری دو اسپویلر در

[1] Wing

خودروهای مورد مطالعه دارد. افزایش طول اسپویلر نیز برای هر دو مدل افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا را در پی داشت.

هریش و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۹ به مطالعه اثرات استفاده از اسپویلر با سطح مقطع ایرفویل NACA 6409 در انتهای بدنه و بالای سقف یک مدل خودروی سدان پرداختند. نتایج شبیه‌سازی عددی آن‌ها اثبات نمود بکارگیری اسپویلر در بالای سقف خودرو باعث کاهش مضاعف نیروی برآ نسبت به هنگام بکارگیری در انتهای بدنه می‌شود و در نتیجه افزایش کنترل‌پذیری، عملکرد بهینه ترمزها، افزایش انتقال قدرت در لاستیک‌ها و تثبیت سرعت خودرو را در پی دارد. پژوهشگران همچنین به بررسی نیروهای آیرودینامیکی در سرعت‌های مختلف خودرو نیز پرداختند که افزایش نیروی پسا و نیروی برآ در پی افزایش سرعت خودرو مشاهده شد.

کیم و همکاران [۱۵] عملکرد آیرودینامیکی یک مدل ون کوچک هنگام اتصال اسپویلر به انتهای آن را مورد تحقیق قرار دادند. اسپویلر در بالای شیشه عقب خودرو قرار گرفته و به گونه‌ای طراحی شده است که بخشی از جریان روی سقف را به پشت خودرو منتقل کند. نتایج پژوهش نشان از کاهش در نیروی پسا و نیروی برآ به ترتیب به میزان ۵٪ و بیش از ۱۰۰٪ دارد که اصلی‌ترین علت آن نوع طراحی اسپویلر و نحوه هدایت جریان عبوری می‌باشد که در شکل ۹ نشان داده شده است:



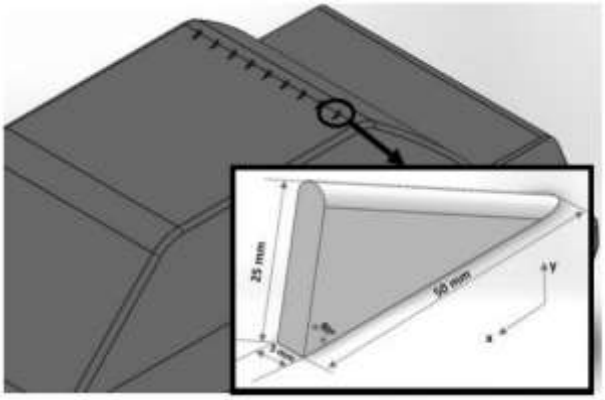
شکل ۹ اسپویلر بکار رفته در بالای شیشه عقب خودروی هاچ‌بک [۱۵]

ناث و همکاران [۶] بر روی اثرات بکارگیری اسپویلر در خودروی اسپرت مطالعه کردند. کاهش ضریب پسا به میزان ۱۵٪/۲ و کاهش ضریب برآ به میزان قابل توجه ۵۵/۷٪ از جمله نتایج این پژوهش است. دلیل تاثیر بالای استفاده از اسپویلر در این نمونه، تاخیر در جدایش و وقوع اجباری و ناگهانی آن می‌باشد که باعث کاهش گردابه‌های پشت خودرو نیز گردیده است. همچنین در این مطالعه تاثیر استفاده از بال در انتهای خودرو مورد بررسی قرار گرفت که موجب افزایش ضریب پسا به میزان ۳۸/۵٪ و کاهش بسیار بالا در ضریب برآ به میزان ۱۰۷٪ شد. تفاوت بال و اسپویلر در ارتفاع عملکرد آن‌ها است به طوری که اسپویلر بدون فاصله از بدنه نصب می‌شود، اما بال با ارتفاع و بر روی پایه به بدنه متصل می‌گردد. به همین دلیل افزایش نیروی پسا در این پژوهش هنگام بکارگیری بال به دلیل هندسه و محل قرارگیری آن می‌باشد که باعث افزایش گردابه‌ها در پشت خودرو می‌شود.

دیکسون و همکاران [۵] تاثیر استفاده از بال در عقب خودروی اسپرت را مورد بررسی قرار دادند که نتایج آن نشان دهنده افزایش ضریب پسا به میزان ۲/۴۵٪ و کاهش ضریب برآ به میزان ۸۸/۵٪ می‌باشد. تاثیرگذاری پایین بر نیروی پسا در مدل مورد مطالعه به علت پنهان بودن آن در پشت شیشه عقب است که موجب افزایش گردابه‌های پشت خودرو نمی‌گردد.

۴- مولد گردابه

از دیگر روش‌های کاهش نیروی پسا استفاده از مولدهای گردابه است که در انتهای سقف قرار می‌گیرند و با آشفته سازی جریان هوا موجب تاخیر در جدایش و کاهش ناحیه ویک پشت خودرو می‌شوند. صالح و علی [۱۲] به مطالعه پیرامون تاثیر استفاده از مولدهای گردابه در آیرودینامیک خودروی سدان پرداختند که باعث کاهش ضریب پسا به میزان ۱/۷٪ گردید. در شکل ۱۰ مولدهای گردابه بکار رفته در تحقیق مذکور نشان داده شده است:



شکل ۱۰ نحوه قرارگیری مولدهای گردابه‌ای در انتهای سقف خودرو [۱۲]

شانکار و دواراجان [۱۶] به صورت عددی و تجربی با تحقیق بر روی اثرات بکارگیری مولد گردابه در یک مدل خودروی سدان به این نتیجه رسیدند که مولد گردابه به شکل دلتا (که نمونه

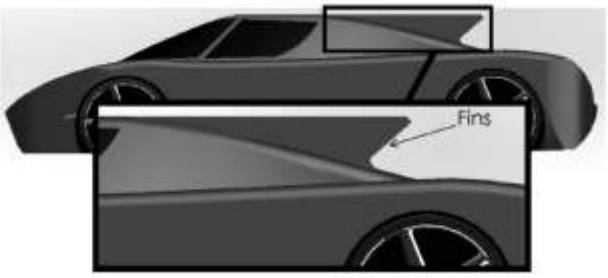
مشابه آن در شکل ۷ نشان داده شده است) مناسب‌ترین هندسه برای کاهش نیروی‌های آیرودینامیکی خودروها می‌باشد به گونه‌ای که برای این مدل موجب کاهش ضریب پسا به میزان ۴/۴۶٪ و کاهش ضریب برآ به میزان ۲/۷۶٪ گردید.

در پژوهشی مشابه رامن و راهول [۱۷] با اضافه نمودن مولدهای گردابه به انتهای سقف یک مدل خودرو شاسی بلند به این نتایج دست یافتند که ضرایب آیرودینامیکی هنگام بکارگیری مولد گردابه کاهش یافت و همچنین استفاده از هندسه دلتا نسبت به ایجاد برآمدگی اثرگذاری بیشتری دارد.

در سال ۱۳۹۸ کاظمی و همکاران [۱۸] به صورت عددی به بررسی تاثیر هندسه مولدهای گردابه بر نیروی پسا بدنه احمد[1] پرداختند. تحقیق آن‌ها نشان داد مولدهای گردابه ایرفویلی و سیلندری موجب کاهش ضریب پسا به ترتیب به میزان ۰/۷٪ و ۱/۱٪ گردید. از دیگر نتایج بهبود عملکرد مولدهای گردابه در سرعت‌های پایین است. این بدان معناست که با افزایش رینولدز به علت افزایش اینرسی، چسبندگی جریان به بدنه کاهش یافته و جدایش سریع‌تر اتفاق می‌افتد و این با عملکرد مولد گردابه که وظیفه تاخیر در جدایش جریان از بدنه را دارد در تضاد است.

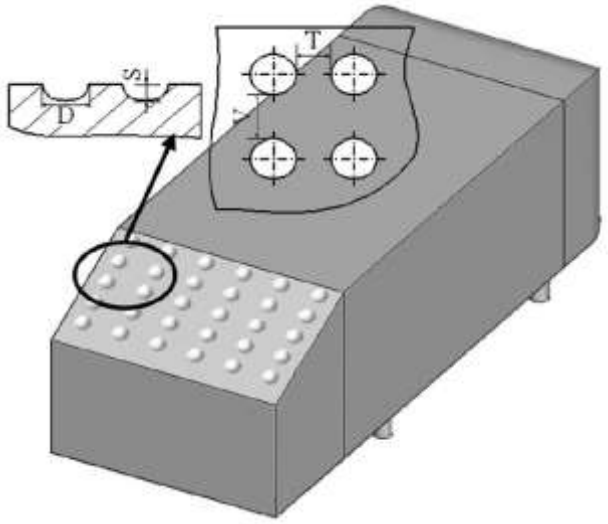
۵- سایر مکانیزم‌ها

اتصال پره[2] به انتهای خودرو به خصوص در کناره‌های سقف و شیشه عقب از دیگر روش‌های توسعه آیرودینامیک خودروها است که با جلوگیری از انحراف جریان هوای مجاور سقف و شیشه عقب و انتقال کامل آن به پشت بدنه و بالای صندوق عقب، باعث افزایش فشار در ناحیه کم فشار نسبت به نمونه بدون پره می‌شود. ناث و همکاران [۶] با اضافه نمودن پره به یک مدل خودروی اسپرت به این نتیجه دست یافتند که ضریب پسا به میزان ۱/۶٪ و ضریب برآ به میزان ۱۴٪ با کاهش روبرو شدند. افزایش فشار در قسمت فوقانی و کاهش اختلاف فشار بالا و پایین خودرو، دلیل تاثیرگذاری نسبتا بالا بر روی نیروی برآ است. در شکل ۱۱ پره‌های متصل شده به بدنه خودرو در پژوهش مذکور مشاهده می‌شود:



شکل ۱۱ محل اتصال پره‌ها [۶]

از جمله دیگر عوامل موثر بر آیرودینامیک خودروها، زبری سطح بدنه می‌باشد که وانگ و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۶ با تحقیق این عامل بر روی بدنه احمد اثبات کردند افزایش زبری سطح با ایجاد چندین تورفتگی در انتهای بدنه به خصوص ناحیه جدایش، موجب بوجود آمدن گردابه‌های ریز و ایجاد ناپایداری جریان در محل تورفتگی‌ها شد که در پی آن جدایش جریان از بدنه به تاخیر افتاده و ضریب پسا به میزان ۵/۲٪ کاهش یافت که شکل ۱۲ نشان دهنده مدل مورد مطالعه می‌باشد:

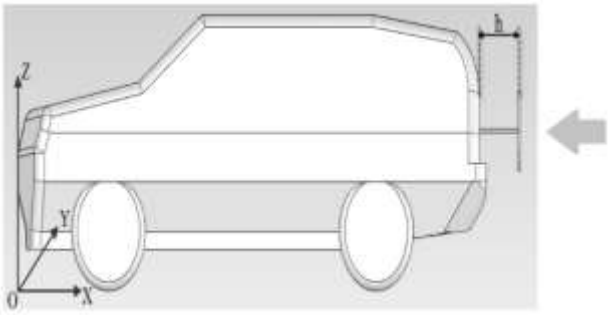


شکل ۱۲ تورفتگی‌های بوجود آمده در انتهای بدنه احمد [۱۹]

رامن و راهول [۱۷] روش دیگری را برای بهبود عملکرد آیرودینامیکی یک مدل خودروی شاسی بلند ارائه نمودند که طی آن با اتصال یک صفحه تخت عمودی با فاصله به انتهای بدنه، نیروی پسا به میزان ۶/۵٪ کاهش یافت. دلیل این امر ایجاد اغتشاش و افزایش فشار ناشی از برخورد جریان به صفحه تخت در پشت خودرو می‌باشد. همچنین این پژوهشگران اثبات کردند که افزایش فاصله صفحه تخت از بدنه موجب تاثیرگذاری بیشتر

[1] Ahmed body
[2] Fin

آن بر کاهش نیروی پسا گردید. در شکل ۱۳ شماتیکی از محل قرارگیری صفحه تخت انتهای بدنه نشان داده شده است:



شکل ۱۳ محل قرارگیری صفحه عقب [۱۷]

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه کاهش نیروی پسا با استفاده از روش کنترل جریان انفعالی صورت پذیرفت. به طور کلی اثرگذاری مکانیزم‌ها به هندسه و نوع خودرو بستگی دارد و پیش‌بینی قطعی درباره تاثیر مثبت یا منفی آن‌ها امکان پذیر نمی‌باشد، به همین دلیل نتایج تحقیقات بررسی شده در هر مکانیزم با یکدیگر تفاوت اندکی دارند اما با توجه به این که نیروهای آیرودینامیکی ناشی از اختلاف فشار در نواحی مختلف اجسام هستند، به طور کلی در وسایل نقلیه انتقال جریان هوای اطراف خودرو از نواحی فشار بالا به نواحی فشار پایین به دلیل کاهش گردابه‌ها و ایجاد تغییر در فشار حرکت جریان هوا بر روی بدنه در جلو و عقب خودرو، تاثیر زیادی بر کاهش نیروی پسا می‌گذارد. لازم به توجه است هنگام استفاده از کانال انتقال هوا، باید اختلاف فشار دو سر کانال برای ایجاد تغییر فشار مناسب و طول کانال نیز کوتاه باشد تا موجب ایجاد نیروی پسای اصطکاکی نگردد هر چند که این نیرو در خودروها نسبت به نیروی پسای فشاری مقدار کمتری دارد اما در نیروی پسای کل تاثیرگذار است و باید مورد توجه قرار گیرد. همچنین استفاده از اسپویلر و بال در عقب خودرو به علت تاخیر در جدایش جریان از بدنه و هدایت آن به سمت بالا تاثیر مناسبی بر کاهش نیروی برآ دارد. این عامل موجب ایجاد نیرو به سمت پایین در انتهای بدنه شده و علاوه بر کاهش نیروی برآ، در کنترل‌پذیری خودروها نیز تاثیر مثبتی دارد.

تاکنون شرکت‌های بزرگ خودروسازی جهان تحقیقات و اختراعات زیادی در زمینه بهبود عملکرد آیرودینامیکی خودروها انجام داده‌اند که شایسته است پژوهشگران جهت گسترش مرزهای علم به صورت موردی به بررسی مکانیزم‌ها و توسعه آیرودینامیک وسایل نقلیه بپردازند. با توجه به این که روش بکارگیری کانال انتقال جریان یک مکانیزم جدید است می‌توان با مطالعه پژوهش‌های انجام شده و نحوه پیاده سازی آن بر روی خودروهای ساخته شده، به بررسی عوامل موثر در بهبود عملکرد کانال‌ها جهت کاهش نیروی پسا و عدم تغییر نیروی برآ بر روی انواع خودروها پرداخت.

۷- مراجع

[1] Behravan, R., Mahdi, M., Numerical simulation of the combined effects of the rear spoiler and the curvature of the lateral surfaces on the lift and drag forces on the sedan type vehicle, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 305-315, (2018). (in Persian)

[2] Sudin, M.N., Abdullah, M.A., Shamsuddin, S.A., Ramli, F.R., Tahir, M.M., Review of research on vehicles aerodynamic drag reduction methods, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 37-47, (2014).

[3] Doost, A.K., Yazdi, A.M.S.Z., Green nature and reducing of air pollution with vehicle drag coefficient correction, *Journal of Advances in Energy Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 28-33, (2013).

[4] Hu, X., Yang, B., Lei, Y., Wang, J., Li, X., Liao, L., Xu, T., Automotive shape optimization using the radial basis function model based on a parametric surface grid, *Journal of Automobile Engineering*, Vol. 230, No. 13, pp. 1808-1821, (2016).

[5] Dickison, M., Ghaleeh, M., Milady, S., Wen, L.T., Qubeissi, M.A., Investigation into the aerodynamic performance of a concept sports car, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 13, No. 2, pp. 583-601, (2020).

[6] Nath, D.S., Pujari, P.C., Jain, A., Rastogi, V., Drag reduction by application of aerodynamic devices in a race car, *Journal of Advances in Aerodynamics*, Vol. 3, No. 4, pp. 1-20, (2021).

[7] Xian, Q.U., Feng, Y.U., Optimization on stepping automotive wake structures based on orthogonal test method. *Journal of Automotive Safety and Energy*, Vol. 8, No. 1, pp. 59, (2017).

[8] Varney, M., Passmore, M., Gaylard, A., The effect of passive base ventilation on the aerodynamic drag of a generic SUV vehicle, *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, Vol. 10, pp. 345-357, (2017).

[9] Guo, Z., Zhang, Y., Ding, W., Optimization of the aerodynamic drag reduction of a passenger hatchback car, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 233, No. 8, pp. 2819-2836, (2019).

[10] Hirst, T., Li, C., Yang, Y., Brands, E., Zha, G., Bluff body drag reduction using passive flow control of jet boat tail, *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, Vol. 8, pp. 713-721, (2015).

[11] Hassan, S.R., Islam, T., Ali, M., Islam, M.Q., Numerical study on aerodynamic drag reduction of racing cars, *Procedia Engineering*, Vol. 90, pp. 308-313, (2014).

[12] Saleh, Z., Ali, A., Numerical Investigation of Drag Reduction Techniques in a Car Model, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 671, Kerbala, Iraq, November 4-6, (2019).

[13] Rohani, M., *Numerical simulation of car's Aerodynamics and increase Aerodynamic performance of it body Spoiler and Diffuser*, M.Sc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, (2018). (in Persian)

[14] Harish, G., Kumar, G.S., Babu, P.S., Modeling and CFD Analysis to Access Aerodynamics Effect of Car for Lift Reduction, *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 10, No. 12, pp. 444-455, (2019).

[15] Kim, I., Chen, H., Shulze, R.C., A rear spoiler of a new type that reduces the aerodynamic forces on a mini-van", *SAE Technical Paper*, USA, (2006).

[16] Shankar, G., Devaradjane, G., Experimental and computational analysis on aerodynamic behavior of a car model with vortex generators at different yaw angles, *Journal of Applied Fluid Mechanic*s, Vol. 11, No. 1, pp. 285-295, (2018).

[17] Raman, L.A., Rahul, H.H., Methods for reducing aerodynamic drag in vehicles and thus acquiring fuel economy, *Journal of Advanced Engineering Research*, Vol. 3, No. 1, pp. 26-32, (2016).

[18] Kazemi, M., Ghanooni, P., Mani, M., Investigation of the aerodynamic effect of vortex generator placement on the car model, *Proceedings of The 18th Conference on Fluid Dynamics*, Mashhad, Iran, August, (2019). (in Persian)

[19] Wang, Y., Wu, C., Tan, G., Deng, Y., Reduction in the aerodynamic drag around a generic vehicle by using a non-smooth surface, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 231, No. 1, pp. 130-144, (2017).