ISSN: mechanical-eng.ir

ISSN:

ارائه یک چارچوب نوآورانه‌ی بهینه‌سازی چندرشته‌ای برای طراحی آیرودینامیک یکپارچه‌ی خودروهای هایپراسپورت: تلفیق آیرودینامیک فعال، دینامیک خودرو و مدیریت حرارتی
علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد

جلد ۱، شماره ۱، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه: ۲۵۲ تا ۲۶۹

# ارائه یک چارچوب نوآورانه‌ی بهینه‌سازی چندرشته‌ای برای طراحی آیرودینامیک یکپارچه‌ی خودروهای هایپراسپورت: تلفیق آیرودینامیک فعال، دینامیک خودرو و مدیریت حرارتی

**علیرضا محمودی فرد*[۱]، سید محمدرضا حسینی علی آباد[۲]**

[۱]پسادکترای آینده‌پژوهی و مدرس دانشگاه ملی مهارت، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران، alireza۱۰.m۱۰@gmail.com

[۲]پست دکتری مدیریت بازرگانی-مدیریت استراتژیک، دانشگاه بین‌المللی نورث‌وست ارمنستان، info@confnashr.ir

ISSN

مجله علمی نوآوری و تحقیق در مهندسی مکانیک

## چکیده

طراحی آیرودینامیک خودروهای هایپراسپورت به‌عنوان یک مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه‌ی پیچیده، نیازمند رویکردی سیستماتیک و یکپارچه است. این مقاله با هدف غلبه بر چالش‌های موجود در هماهنگی بین اهداف متعارض نیروی رو به پایین، پسا و پایداری، ضمن درنظرگرفتن ملاحظات سازه‌ای و حرارتی، یک چارچوب طراحی نوآورانه را پیشنهاد می‌دهد. چارچوب پیشنهادی مبتنی‌بر بهینه‌سازی چندرشته‌ای (MDO) است که شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی، دینامیک چندبدنه‌ی خودرو، تحلیل سازه و مدیریت حرارتی را در یک محیط کوپل‌شده ادغام می‌کند. در این راستا، نقش سامانه‌های آیرودینامیک فعال و تطبیقی با الگوریتم‌های کنترل هوشمند، و همچنین تأثیر برهم‌کنش سیال-سازه در اجزای کامپوزیتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج تحلیلی براساس داده‌های تجربی و عددی پیشین نشان می‌دهد که رویکرد یکپارچه می‌تواند منجر به تعریف یک «منطقه‌ی بهینه‌ی پویا» برای عملکرد کلی شود، که در آن مصالحه‌ای برتر بین کارایی آیرودینامیکی، پایداری دینامیکی و قابلیت‌های عملیاتی حاصل می‌گردد. درنهایت، مقاله راهکارهایی برای توسعه‌ی سامانه‌های هوشمند مبتنی‌بر یادگیری ماشین و سطوح تطبیق‌پذیر به‌عنوان افق پژوهشی آتی ارائه می‌دهد.

**کلمات کلیدی**

آیرودینامیک‌هایپراسپورت، بهینه‌سازی چندرشته‌ای، آیرودینامیک فعال، دینامیک خودرو، برهم‌کنش سیال-سازه، مدیریت حرارتی آیرودینامیکی، کنترل مبتنی‌بر یادگیری ماشین، طراحی یکپارچه

**مقدمه**

صنعت خودروسازی ورزشی و به‌ویژه حوزه‌ی هایپراسپورت، همواره در خط مقدم نوآوری‌های مهندسی و به‌کارگیری فناوری‌های پیشرفته قرار داشته است. این دسته از خودروها که در مرز توانایی‌های مکانیکی و فیزیکی حرکت می‌کنند، نه‌تنها نمادین‌ترین محصولات مهندسی خودرو محسوب می‌شوند، بلکه به‌عنوان بستری حیاتی برای توسعه و انتقال فناوری‌های نوین به تولید انبوه عمل کرده‌اند (Katz, ۲۰۰۶). در این میان، آیرودینامیک به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین شاخه‌های علوم مهندسی در طراحی این خودروها ظهور کرده است. نقش آیرودینامیک دیگر محدود به کاهش نیروی پسا برای دستیابی به سرعت‌های اوج بالا نیست، بلکه اکنون خلق نیروی downforce (نیروی رو به پایین) کنترل‌شده و پایدار برای بهبود چسبندگی، پایداری و رفتار دینامیکی در کلیه‌ی سرعت‌ها، به‌ویژه در پیچ‌ها، به هدفی کلیدی تبدیل شده است (Hucho, ۲۰۱۳). این تحول، طراحی آیرودینامیک خودروهای هایپراسپورت را به یک مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه‌ی پیچیده تبدیل کرده است که در آن باید میان اهداف به‌ظاهر متعارضی همچون کمینه‌سازی پسا، بیشینه‌سازی نیروی رو به پایین، حفظ پایداری جهتی و طولی، و همچنین ملاحظات عملیاتی مانند قابلیت استفاده در شرایط جاده‌ای (Road-going) و خنک‌کاری بهینه‌ی سامانه‌های پیشرانه و ترمز، توازن ایجاد کرد (Barnard, ۲۰۱۹). رویکردهای سنتی طراحی که بیش‌تر متکی بر روش‌های تجربی و آزمون‌وخطا در تونل باد بودند، اگرچه هنوز جایگاه تأیید نهایی را دارند، اما به‌دلیل هزینه و زمان بالای توسعه، کارایی لازم برای پاسخگویی به چالش‌های فعلی و آتی را ندارند. از این رو، پارادایم جدیدی در طراحی آیرودینامیک مبتنی‌بر شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با دقت بالا، به‌همراه الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند و یکپارچه‌سازی عمیق‌تر با سامانه‌های مکانیکی خودرو شکل گرفته است (Katz, ۲۰۱۶). علاوه‌بر این، ظهور فناوری‌های آیرودینامیک فعال و نیمه‌فعال (Active and Semi-active Aerodynamics) انقلابی در توانایی طراحان برای غلبه‌بر محدودیت‌های ذاتی طرح‌های ایستا به‌وجود آورده است. این سامانه‌ها با تغییر پیکربندی اجزای آیرودینامیکی در حین حرکت و براساس شرایط رانندگی، این امکان را فراهم می‌سازند که هم عملکرد در پیست و هم قابلیت رانندگی در جاده به‌طور همزمان به سطح بی‌سابقه‌ای ارتقا یابد (Dominy, ۲۰۱۳). بااین‌حال، ادغام این سامانه‌های پویا بدون افزایش وزن غیرقابل قبول یا ایجاد پیچیدگی‌های کنترل‌ناپذیر، خود چالش جدیدی است. این مقاله با درنظرگرفتن این پیشینه‌ی پویا و با هدف ارائه‌ی چارچوبی نوآورانه برای طراحی آیرودینامیک خودروهای هایپراسپورت نگاشته می‌شود. رویکرد پیشنهادی بر یکپارچه‌سازی سه‌گانه‌ی «شبیه‌سازی‌های CFD چندمقیاسی با صحه‌گذاری تجربی»، «الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه‌ی مبتنی‌بر هوش محاسباتی» و «مدلسازی سامانه‌های آیرودینامیک فعال با کنترل تطبیقی» استوار است. این پژوهش بر آن است تا گامی فراتر از مطالعات پراکنده‌ی موجود برداشته و با نگاهی سیستماتیک و کل‌نگر، به تحلیل و ارائه‌ی راه‌حلی برای تنش ذاتی میان کارایی حداکثری، پایداری دینامیکی و قابلیت استفاده‌ی عملی در طراحی‌های آیرودینامیک هایپراسپورت بپردازد.

**بیان مسأله**

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در طراحی آیرودینامیک خودروهای هایپراسپورت و دستیابی به سطوح بی‌سابقه‌ای از نیروی رو به پایین و سرعت، یک چالش بنیادی و حل‌نشده به‌صورت جامع، همچنان پابرجاست: نبود یک چارچوب طراحی سیستماتیک، یکپارچه و مبتنی‌بر بهینه‌سازی چندرشته‌ای (Multidisciplinary Design Optimization – MDO) است که بتواند به‌طور همزمان برهم‌کنش‌های پیچیده و اغلب متعارض بین اهداف آیرودینامیکی (نیروی رو به پایین، پسا، پایداری)، الزامات ساختاری (وزن،

استحکام، انعطاف‌پذیری)، مدیریت حرارتی پیشرانه/باتری، و دینامیک واقعی خودرو در شرایط عملیاتی گذرا را مدلسازی و بهینه‌سازی کند. رویکردهای موجود عمدتاً بر بهینه‌سازی جزءبه‌جزء یا استفاده از سامانه‌های فعال با الگوریتم‌های کنترل ساده متمرکزند که منجر به طراحی‌های نیمه‌بهینه، افزایش غیرضروری پیچیدگی و وزن، و از دست رفتن پتانسیل کامل عملکرد یکپارچه می‌شود. این شکاف، به‌ویژه با ظهور فناوری‌های نوینی مانند سامانه‌های کاملاً فعال، مواد هوشمند و پیشرانه‌های الکتریکی، بارزتر شده و نیازمند یک پارادایم نظری و کاربردی جدید است.

**اهداف پژوهش**

هدف اصلی: بررسی توسعه‌ی یک چارچوب نوآورانه و کمّی برای بهینه‌سازی چندرشته‌ای و چندمقیاسی طراحی آیرودینامیک خودروهای هایپراسپورت که یکپارچگی عمیق بین آیرودینامیک (شامل اجزای فعال)، دینامیک خودرو، تحلیل سازه و مدیریت حرارتی را در یک محیط شبیه‌سازی کوپل‌شده ممکن سازد.

اهداف فرعی:

۱. بررسی تدوین یک مدل محاسباتی دقیق و صحه‌گذاری‌شده برای شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال-سازه (FSI) در اجزای آیرودینامیکی انعطاف‌پذیر تحت بارهای آیرودینامیکی و حرارتی متغیر.

۲. بررسی مباحث طراحی و مدل‌سازی یک الگوریتم کنترل پیش‌بین مبتنی‌بر یادگیری ماشین برای سامانه‌های آیرودینامیک فعال که قادر به بهینه‌سازی بلادرنگ پیکربندی آیرودینامیکی با درنظرگرفتن پیش‌بینی وضعیت دینامیکی آتی خودرو باشد.

۳. بررسی تعیین و کمّی‌سازی Trade-off بهینه بین اهداف متعارض (نیروی رو به پایین، پسا، مصرف انرژی خنک‌کاری، وزن سازه) در قالب یک پارتوی بهینه (Pareto Front) برای یک هندسه‌ی معیار (Benchmark) تحت چرخه‌های رانندگی واقعی.

۴. ارائه‌ی پیشنهادهایی برای طراحی یک «سطح چندوظیفه‌ای هوشمند» که بتواند نقش هم‌زمان در تولید نیروی آیرودینامیکی، دفع حرارت و حفظ استحکام ساختاری ایفا کند.

**سوالات پژوهش**

سوال اصلی: چگونه می‌توان یک چارچوب بهینه‌سازی چندرشته‌ای طراحی کرد که عملکرد کلی یک خودروی هایپراسپورت را با یکپارچه‌سازی کمّی آیرودینامیک (فعال/غیرفعال)، دینامیک خودرو، ملاحظات سازه‌ای و مدیریت حرارتی در شرایط عملیاتی دینامیکی به حداکثر برساند؟

سوالات فرعی:

۱. تغییر شکل الاستیک اجزای آیرودینامیکی کامپوزیتی تحت بارهای گذرای آیرودینامیکی و حرارتی، چه تأثیر کمّی بر توزیع نیروی رو به پایین و مرکز فشار دارد و چگونه می‌توان این اثر را در الگوریتم کنترل جبران کرد؟

۲. یک الگوریتم کنترل پیش‌بین مبتنی‌بر یادگیری تقویتی در مقایسه با کنترلرهای کلاسیک واکنشی، تا چه حد می‌تواند کارایی سامانه‌های آیرودینامیک فعال را در بهبود شاخص‌هایی مانند زمان دور پیست یا پایداری گذرا افزایش دهد؟

۳. در یک طراحی یکپارچه، سهم بهینه‌ی هر یک از زیرسیستم‌های آیرودینامیکی (زیرکفی/دیفوزر، باله، کانارد) در تولید نیروی رو به پایین کل و تأثیر آن بر توزیع وزن دینامیکی چگونه است؟

۴. برای یک خودروی هایپراسپورت الکتریکی، چگونه می‌توان مسیرهای جریان خنک‌کاری باتری و درایو یونیت را به‌گونه‌ای در بدنه یکپارچه کرد که حداقل اختلال را در الگوی جریان آیرودینامیکی بیرونی ایجاد نماید؟

**متن اصلی**

طراحی آیرودینامیک خودروهای هایپراسپورت، یک پارادایم مهندسی متمایز و چندرشته‌ای است که فراتر از اصول متعارف حاکم بر خودروهای معمولی یا حتی مسابقه‌ای عمل می‌کند. هسته‌ی مرکزی این پارادایم، ایجاد تعادل پویا و هوشمندانه بین سه هدف بنیادین و اغلب متعارض است: تولید نیروی رو به پایین (Downforce) استثنایی برای افزایش چسبندگی و پایداری در شتاب‌های جانبی و طولی بالا، کمینه‌سازی نیروی پسا (Drag) برای دستیابی به سرعت‌های حداکثر قابل‌توجه، و حفظ پایداری جهت‌ی (Directional Stability) تحت شرایط جریان‌های پیچیده و اغلب آشفته‌ای که در سرعت‌های بسیار بالا و زوایای حملهٔ متفاوت ایجاد می‌شوند (Hucho, ۲۰۱۳). این سه‌گانه‌ی عملکردی، به‌صورت ذاتی در تنش با یکدیگر قرار دارند؛ برای مثال، افزایش نیروی رو به پایین اغلب مستلزم افزایش سطح در معرض جریان یا زوایای حمله‌ی بزرگ‌تر است که خود باعث افزایش پسا می‌شود (Katz, ۲۰۰۶). از این رو، فلسفه‌ی طراحی نوین در این حوزه، دیگر جست‌وجو برای یک نقطه‌ی بهینه‌ی مطلق نیست، بلکه تعریف یک «منطقه‌ی بهینه‌ی پویا (Dynamic Optimal Envelope)» است که در آن، رفتار آیرودینامیکی خودرو بتواند براساس شرایط عملیاتی تغییر کند. اینجاست که نقش فناوری‌های آیرودینامیک فعال (Active Aerodynamics) به‌عنوان یک راه‌حل انقلابی پررنگ می‌شود. برخلاف اجزای ایستا (Static) یا غیرفعال (Passive)، سامانه‌های فعال قادرند پیکربندی خود را در کسری از ثانیه و براساس داده‌های دریافتی از حسگرهای سرعت، شتاب، زاویه فرمان و حتی وضعیت جاده تطبیق دهند. نمونه‌های بارز این فناوری، سپرهای جلوی فعال (Active Front Splitters)، دیفوزرهای با زاویه‌ی متغیر (Variable-Angle Diffusers) و باله‌های عقب فعال (Active Rear Wings) هستند که می‌توانند از حالت کم‌پسا (Low-Drag) برای حداکثر سرعت به حالت پرنیرو (High-Downforce) برای فرمان‌پذیری و ترمزگیری در پیچ تغییر وضعیت دهند (Dominy, ۲۰۱۳). بااین‌حال، پیاده‌سازی این سامانه‌ها، چالش‌های مهندسی عمیقی را به‌همراه دارد که از جمله می‌توان به افزایش وزن، پیچیدگی مکانیکی، نیاز به توان کنترلی بالا و ملاحظات قابلیت اطمینان اشاره کرد. یکی از نوآوری‌های کلیدی برای غلبه‌بر این موانع، حرکت به‌سوی طراحی‌های یکپارچه‌سازی‌شده (Integrated Designs) است. در این رویکرد، اجزای آیرودینامیکی نه به‌عنوان الحاقات مجزا، بلکه به‌مثابه بخشی ذاتی و تفکیک‌ناپذیر از بدنه و کف خودرو طراحی می‌شوند. برای نمونه، طراحی کانال‌های هوای ورودی (Air Intakes) و مسیرهای خنک‌کاری (Cooling Ducts) به‌صورتی که علاوه‌بر تأمین نیازهای حرارتی پیشرانه و ترمزها، به‌عنوان عناصری برای هدایت جریان و کاهش آشفتگی (Turbulence) عمل کنند، یا یکپارچه‌سازی باله‌ی عقب با سازه‌ی پشت بدنه (Rear Clamshell) برای استحکام ساختاری بیشتر و کاهش تعداد قطعات (Barnard, ۲۰۱۹). در لایه‌ای عمیق‌تر، تحلیل و بهینه‌سازی این پیکربندی‌های پیچیده، مستلزم به‌کارگیری پیشرفته‌ترین ابزارهای شبیه‌سازی عددی است. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با مدل‌های آشفتگی پیشرفته (مانند LES یا DES) امکان شبیه‌سازی رفتار جریان با وضوح بسیار بالا را فراهم می‌کند، اما نقطه‌ی اوج کارایی، در ترکیب این شبیه‌سازی‌ها با الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه (Multi-objective Optimization) مانند الگوریتم‌های ژنتیک (Genetic Algorithms) یا روش‌های مبتنی‌بر کریجینگ (Kriging-based Methods) نهفته است. این ترکیب، به طراح اجازه می‌دهد تا هزاران طرح را به‌صورت مجازی مورد ارزیابی قرار داده و پارتویی (Pareto Front) از طرح‌های بهینه را شناسایی کند که بهترین مصالحه را بین اهداف رقیب ارائه می‌دهند (Molinari et al., ۲۰۲۱). علاوه‌بر این، تحلیل برهم‌کنش آیرودینامیک با دینامیک خودرو (Vehicle Dynamics)جنبه‌ای حیاتی و اغلب مورد غفلت در مطالعات اولیه است. نیروهای آیرودینامیکی تولیدشده، تأثیر مستقیمی بر توزیع وزن دینامیکی (Dynamic Weight Transfer)، پاسخ سیستم تعلیق و در نهایت رفتار کلی وسیله نقلیه دارند. بنابراین، یک طراحی موفق باید در یک محیط شبیه‌سازی کوپل‌شده (Coupled Simulation Environment) ارزیابی شود که در

آن حلگرهای CFD و دینامیک چندبدنه (MBD) به‌صورت هم‌زمان یا تکرارشونده با یکدیگر تبادل داده می‌کنند تا از صحت نتایج در شرایط واقعی رانندگی اطمینان حاصل شود (Katz, ۲۰۱۶). در نهایت، باید به نقش حیاتی مواد پیشرفته ( Advanced Materials) در تحقق طرح‌های آیرودینامیکی نوآورانه اشاره کرد. استفاده از کامپوزیت‌های الیاف کربن ( Carbon Fiber Reinforced Polymers) نه‌تنها برای کاهش وزن اجزای متحرک فعال (که برای سرعت عمل آن‌ها حیاتی است)، بلکه برای ساخت سطوح پیچیده‌ی با انحناهای دقیق (Precision Curvatures) که کنترل جریان را در مقیاس میلی‌متری ممکن می‌سازد، ضروری است. این سطح از دقت در ساخت، خود تضمین‌کننده‌ی انطباق بین نتایج شبیه‌سازی و عملکرد واقعی در تونل باد یا جاده است.

**پیشینه پژوهش**

تکامل طراحی آیرودینامیک خودروهای هایپراسپورت ریشه در تحقیقات و دستاوردهای حوزه‌ی مهندسی خودروهای مسابقه‌ای، به‌ویژه فرمول یک و پروتوتایپ‌های اندورانس، دارد. نخستین گام‌های جدی در درک تأثیر آیرودینامیک بر عملکرد خودروهای سریع به دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ میلادی بازمی‌گردد، جایی که پژوهش‌های پایه‌ای توسط محققانی چون جوزف کاتز شکل گرفت و مفهوم نیروی رو به پایین آیرودینامیکی به‌عنوان یک عامل بهبود دهنده‌ی چسبندگی و زمان‌های دورپیچ معرفی شد (Katz, ۲۰۰۶). در این دوران، مطالعات عمدتاً تجربی و مبتنی‌بر آزمون در تونل باد و پیست بود و تمرکز اصلی بر روی فرم‌های ساده‌شده‌ی دو بعدی مانند ایرفویل‌ها قرار داشت. با ورود به عصر محاسبات، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در دهه‌ی ۱۹۹۰ تحولی اساسی ایجاد کرد و امکان تحلیل جریان سه‌بعدی با جزئیات بیشتر فراهم شد. کتاب مرجع هوچو با عنوان «آیرودینامیک خودروهای جاده‌ای» چارچوب نظری جامعی را برای تحلیل سیستماتیک جریان حول بدنه‌ی خودرو، از جمله مسائل مهمی مانند جدایی جریان، گردابه‌ها و برهم‌کنش جریان چرخ‌ها با بدنه، ارائه داد (Hucho, ۲۰۱۳). در هزاره‌ی جدید، پژوهش‌ها به‌سمت بهینه‌سازی چندهدفه و یکپارچه‌سازی پیش رفت. مطالعه‌ی پیشگامانه‌ی بارنارد بر روی طراحی آیرودینامیک وسایل نقلیه‌ی جاده‌ای، مفاهیم کاربردی کاهش پسا و افزایش پایداری را برای خودروهای اسپرت پیشرفته تشریح و لزوم درنظرگرفتن ملاحظات عملیاتی مانند شرایط جاده و خنک‌کاری را برجسته کرد (Barnard, ۲۰۱۹). هم‌زمان، پژوهش‌ها در حوزه‌ی خودروهای مسابقه‌ای به‌طور فزاینده‌ای بر سامانه‌های آیرودینامیک فعال متمرکز شد. دامینی در بررسی‌های خود بر روی آیرودینامیک خودروهای مسابقه‌ای، پتانسیل و چالش‌های فناوری‌هایی مانند بال‌های متغیر و سیستم‌های کنترل جریان فعال را برای تطبیق عملکرد در شرایط مختلف رانندگی تحلیل کرد (Dominy, ۲۰۱۳). در سال‌های اخیر، پژوهش‌های نوآورانه به‌سمت یکپارچه‌سازی عمیق‌تر شبیه‌سازی‌های آیرودینامیکی با دینامیک خودرو و بهینه‌سازی مبتنی‌بر الگوریتم‌های هوشمند حرکت کرده‌اند. برای نمونه، کاتز در اثر بعدی خود به تحلیل ارتباط تنگاتنگ بین آیرودینامیک و دینامیک خودرو پرداخت و ضرورت مدلسازی کوپل‌شده برای پیش‌بینی دقیق رفتار دینامیکی کامل خودرو تحت تأثیر نیروهای آیرودینامیکی متغیر را نشان داد (Katz, ۲۰۱۶). یک مطالعه‌ی تجربی و عددی برجسته توسط مولیناری و همکاران در سال ۲۰۲۱، به‌طور خاص به بهینه‌سازی چندهدفه‌ی یک بال‌ه‌ی عقب خودروی‌هایپرکار با استفاده از شبیه‌سازی‌های کوپل‌شده‌ی CFD و دینامیک خودرو پرداخت و روش‌شناسی‌ای برای یافتن مصالحه‌ی بهینه بین نیروی رو به پایین، پسا و پایداری ارائه نمود (Molinari et al., ۲۰۲۱). این پژوهش نشان داد که چگونه الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته می‌توانند فضای طراحی را به‌طور سیستماتیک کاوش کنند. علاوه‌بر این، مطالعه‌ی تجربی دقیقی توسط گیلبرت و همکاران در سال ۲۰۲۰، تأثیر پیکربندی‌های مختلف دیفوزر و اسپلیتر را بر عملکرد آیرودینامیکی یک مدل مفهومی هایپراسپورت در تونل باد با سرعت بالا مورد بررسی قرار داد و داده‌های معتبری برای صحه‌گذاری مدل‌های عددی فراهم آورد (Gilbert et al., ۲۰۲۰). باوجود پیشرفت‌های چشمگیر، شکاف

پژوهشی محسوسی در توسعه‌ی یک چارچوب طراحی سیستماتیک، مقیاس‌پذیر و یکپارچه وجود دارد که بتواند به‌طور هم‌زمان جنبه‌های پیچیده‌ی آیرودینامیک فعال، بهینه‌سازی چندمقیاسی، کوپلینگ با دینامیک خودرو و محدودیت‌های ساخت را برای کل بدنه‌ی یک خودروی هایپراسپورت مدرن پوشش دهد.

پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی آیرودینامیک خودروهای پرسرعت انجام شده است که می‌توان آن‌ها را در چند محور اصلی دسته‌بندی کرد. نخست، مطالعات بنیادی بر روی مکانیزم‌های تولید نیروی رو به پایین و کاهش پسا برای اشکال پایه‌ای قرار دارد. پژوهش‌های کلاسیکی مانند کارهای کاتز، اصول تولید نیروی رو به پایین توسط ایرفویل‌های معکوس و تأثیر زاویه‌ی حمله، تحدب و محل قرارگیری آن‌ها بر روی بدنه را تشریح کرده‌اند (Katz, ۲۰۰۶). این مطالعات پایه‌ای، بعدها با درنظرگرفتن پیچیدگی‌های جریان سه‌بعدی حول یک بدنه‌ی کامل توسعه یافتند. هوچو به‌طور سیستماتیک برهم‌کنش اجزای مختلف مانند چرخ‌ها، جایگاه چرخ‌ها، آینه‌ها و برآمدگی‌های بدنه با جریان اصلی را بررسی و ضرورت نگرش به خودرو به‌عنوان یک کل یکپارچه را نشان داد (Hucho, ۲۰۱۳). محور دوم، تحقیقات بر روی بهینه‌سازی شکل بدنه با استفاده از روش‌های عددی است. برای مثال، مطالعه‌ی بارنارد روش‌های مختلف برای کاهش پسا از طریق طراحی یکنواخت سطوح، گردگیری لبه‌ها و مدیریت جریان‌های گذرایی از زیر خودرو را مورد تحلیل قرار داده است (Barnard, ۲۰۱۹). در این حوزه، کارهای زیادی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی شکل (Shape Optimization) انجام شده که اغلب بر روی یک جزء خاص مانند سپر جلو، دیفوزر یا زیرکفی متمرکز بوده‌اند. محور سوم که بسیار مورد توجه قرار گرفته، پژوهش در مورد سامانه‌های آیرودینامیک فعال و تطبیقی است. دامینی عملکرد و مکانیزم‌های مختلفی مانند باله‌های عقب با زاویه‌ی متغیر، دریچه‌های جلوپروانه‌ای متحرک و دیفوزرهای فعال را بررسی و مزایای آن‌ها در تطبیق عملکرد برای سناریوهای سرعت مستقیم و پیچ‌ها را برشمرده است (Dominy, ۲۰۱۳). محور چهارم، پژوهش‌های تجربی برای صحه‌گذاری نتایج عددی و درک پدیده‌های فیزیکی است. مطالعه‌ی گیلبرت و همکاران یک نمونه‌ی اخیر است که با ارائه‌ی داده‌های تونل باد با کیفیت بالا از یک مدل مفهومی، نقش حیاتی پیکربندی دیفوزر و اسپلیتر را در تولید نیروی رو به پایین و مدیریت جریان زیر خودرو کم‌ارتفاع تأیید کرد (Gilbert et al., ۲۰۲۰). محور پنجم، حرکت به‌سوی یکپارچه‌سازی شبیه‌سازی آیرودینامیک با دینامیک خودرو است. کار کاتز در سال ۲۰۱۶ و همچنین پژوهش مولیناری و همکاران در سال ۲۰۲۱، گام‌های مهمی در این جهت برداشته‌اند. آن‌ها نشان دادند که برای پیش‌بینی دقیق عملکرد، نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی محاسبه‌شده از CFD باید مستقیماً به مدل دینامیک چندبدنه‌ی خودرو وارد شوند تا تأثیر آن‌ها بر روی توزیع وزن، پاسخ تعلیق و در نهایت پایداری و قابلیت هدایت ارزیابی گردد (Katz, ۲۰۱۶; Molinari et al., ۲۰۲۱). باوجود این پیشرفت‌ها، خلأهای پژوهشی قابل‌توجهی باقی است. اکثر مطالعات بر روی بهینه‌سازی یک یا دو جزء در شرایط جریان پایا متمرکز بوده‌اند و بررسی پاسخ دینامیکی کامل سامانه‌های فعال در شرایط گذرا و واقعی رانندگی (مانند ورود و خروج از پیچ، ترمزگیری ناگهانی یا تغییر خط) محدود است. همچنین، پژوهش‌های جامعی که تمامی جنبه‌های آیرودینامیکی، گرمایی، سازه‌ای و کنترلی را در یک چارچوب چندرشته‌ای ( Multidisciplinary Design Optimization – MDO) برای طراحی کل بدنه‌ی یک هایپراسپورت ادغام کند، بسیار نادر است. افزون‌براین، تأثیر نوظهور فناوری‌هایی مانند کانال‌های جریان پرسرعت (Synthetic Jet Actuators) یا سطوح تطبیق‌پذیر (Morphing Surfaces) بر عملکرد هایپراسپورت‌ها، حوزه‌ای است که نیازمند کاوش عمیق‌تر است.

**مباحث طراحی آیرودینامیک خودروها**

مباحث اصلی طراحی آیرودینامیک خودروها را می‌توان در چند محور کلیدی، از اصول پایه تا فناوری‌های پیشرفته، دسته‌بندی کرد. نخستین و بنیادی‌ترین مبحث، کاهش نیروی پسا (Drag Reduction) است. پسا عمدتاً از ترکیب پسای اصطکاکی (ناشی از لایه‌ی مرزی) و پسای فشاری (ناشی از جدایی جریان و کم‌فشار شدن ناحیه‌ی عقب خودرو) تشکیل می‌شود. راهکارهای کاهش پسا شامل طراحی بدنه‌ای با ضریب درگ پایین با انحنای یکنواخت و تلاطم‌گیر (Tapering)، گردگیری لبه‌های جلویی و کناری، یکپارچه‌سازی

اجزایی مانند آینه‌ها و دسته‌باربند، و مدیریت جریان چرخ‌ها و جایگاه آن‌ها می‌شود (Hucho, ۲۰۱۳). طراحی سطح زیرین خودرو به‌صورت تا حد امکان صاف و استفاده از پنل‌های محافظ (Underbody Panels) نیز برای کاهش آشفتگی و در نتیجه کاهش پسا حیاتی است. دومین مبحث اساسی، تولید و مدیریت نیروهای عمودی آیرودینامیک است. در خودروهای معمولی هدف معمولاً کاهش لیفت (نیروی رو به بالا) برای بهبود پایداری است، اما در خودروهای اسپرت و مسابقه‌ای، هدف ایجاد نیروی رو به پایین (Downforce) برای افزایش چسبندگی و پایداری دینامیکی است. این نیرو عمدتاً از طریق ایرفویل‌های معکوس (مانند باله‌ی عقب Spoiler/Wing) و طراحی دیفوزر (Diffuser) در عقب خودرو ایجاد می‌شود. دیفوزر با تسریع جریان هوای زیر خودرو، فشار را کاهش داده و نیروی رو به پایین تولید می‌کند. سپرهای جلوی پایین‌آمده (Front Splitters) نیز با جلوگیری از ورود هوا به زیر خودرو و ایجاد یک ناحیه‌ی کم‌فشار، در تولید این نیرو نقش دارند (Katz, ۲۰۰۶). نکته‌ی حائز اهمیت، برهم‌کنش پیچیده بین این اجزا و نیاز به طراحی یکپارچه‌ی آن‌ها برای دستیابی به توزیع متعادل نیروی رو به پایین بین محور جلو و عقب است. سومین مبحث، پایداری جهتی و جانبی (Directional and Lateral Stability) است. طراحی باید به‌گونه‌ای باشد که مرکز فشار (Center of Pressure) در موقعیتی مناسب نسبت به مرکز ثقل خودرو قرار گیرد تا از ایجاد گشتاورهای ناخواسته و حساسیت به وزش باد جانبی (Crosswind Sensitivity) جلوگیری شود. شکل‌دهی صحیح به بدنه، استفاده از باله‌های عمودی کوچک (Fins) و طراحی دقیق باله‌ی عقب می‌تواند به بهبود پایداری مسیر کمک کند (Barnard, ۲۰۱۹). چهارمین مبحث، مدیریت جریان برای خنک‌کاری (Cooling Flow Management) است. ورودی‌های هوا، مجاری و خروجی‌های طراحی‌شده برای رادیاتور، ترمزها و موتور باید به‌گونه‌ای یکپارچه شوند که کمترین تأثیر منفی بر روی آیرودینامیک کلی را داشته باشند. یک طراحی ضعیف می‌تواند باعث افزایش قابل‌توجه پسا شود. هدف، تأمین هوای کافی با کمترین آشفتگی و هدایت کارآمد آن به خارج از بدنه است (Dominy, ۲۰۱۳). پنجمین مبحث پیشرفته، آیرودینامیک فعال و تطبیقی (Active and Adaptive Aerodynamics) است. این فناوری‌ها به خودرو اجازه می‌دهند پیکربندی آیرودینامیکی خود را در حین حرکت تغییر دهد. نمونه‌ها شامل باله‌های عقب متحرک (Active Rear Wings) که در ترمزگیری‌های شدید به‌عنوان ایربریک (Airbrake) عمل می‌کنند، دریچه‌های متغیر در ورودی‌های هوا و حتی سیستم‌های کنترل لایه‌ی مرزی (Boundary Layer Control) می‌شوند. هدف اصلی، غلبه‌بر محدودیت‌های ذاتی طراحی‌های ایستا و ارائه‌ی عملکرد بهینه در شرایط مختلف رانندگی است (Katz, ۲۰۱۶). ششمین مبحث، برهم‌کنش آیرودینامیک و دینامیک خودرو (Aerodynamic-Vehicle Dynamics Interaction) است. نیروهای آیرودینامیکی بر توزیع بار دینامیکی چرخ‌ها، پاسخ سیستم تعلیق و رفتار کلی خودرو تأثیر می‌گذارند. بنابراین، طراحی آیرودینامیک باید همراه با تحلیل دینامیکی و با درنظرگرفتن تغییرات این نیروها با سرعت، زاویه‌ی انحراف جانبی (Slip Angle) و ارتفاع خودرو از زمین انجام پذیرد (Molinari et al., ۲۰۲۱). هفتمین مبحث، روش‌های تحلیل و بهینه‌سازی است که امروزه مبتنی‌بر سه ستون آزمون تونل باد، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و بهینه‌سازی شکل عددی استوار است. CFD امکان تحلیل جزئیات جریان را با هزینه‌ای کمتر از تونل باد فراهم می‌کند و زمانی که با الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه (Multi-Objective Optimization) ترکیب شود، به ابزاری قدرتمند برای یافتن اشکال بهینه تبدیل می‌شود (Gilbert et al., ۲۰۲۰). در نهایت، مبحث آیرواکوستیک (Aeroacoustics) یا مطالعه‌ی نوفه‌ی تولیدشده توسط جریان هوا نیز به‌ویژه برای خودروهای لوکس و جاده‌ای از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است، که هدف در آن کاهش صدای باد در کابین است.

**طراحی آیرودینامیک خودروهای هایپراسپورت**

طراحی آیرودینامیک خودروهای هایپراسپورت یک چالش مهندسی منحصربه‌فرد است که هدف آن دستیابی به حداکثر عملکرد دینامیکی در سرعت‌های بسیار بالا، ضمن حفظ قابلیت کنترل و پایداری در شرایط مختلف جاده و پیست است. برخلاف خودروهای معمولی که تمرکز اصلی بر کاهش پسا (Drag) برای بهبود مصرف سوخت است، در هایپراسپورت‌ها هدف سه‌گانه‌ی حداکثر سازی نیروی رو به پایین (Downforce)، مدیریت هوشمندانه‌ی پسا و تضمین پایداری مطلق است. این اهداف از طریق یک رویکرد یکپارچه و چندرشته‌ای محقق می‌شود. طراحی بدنه و زیرکفی یکپارچه نخستین گام است. بدنه‌ی هایپراسپورت به‌صورت یک ایرفویل معکوس غول‌پیکر عمل می‌کند که هوای عبوری از روی آن با سرعت بیشتری نسبت به هوای زیر آن حرکت می‌کند و براساس اصل برنولی، نیروی رو به پایین ایجاد می‌کند. با این حال، منبع اصلی نیروی رو به پایین در طراحی‌های مدرن، سیستم زیرکفی و دیفوزر است. سطح زیرین کاملاً صاف و مجهز به کانال‌های Venturi و یک دیفوزر بزرگ در انتها طراحی می‌شود. دیفوزر با بازیابی فشار هوای شتاب‌گرفته در زیر خودرو، هم نیروی رو به پایین تولید می‌کند و هم با کاهش آشفتگی، پسا را کاهش می‌دهد (Barnard, ۲۰۱۹). سپر جلو (Splitter) و کانارد‌ها (Canards) در قسمت جلو، هوای ورودی به زیر خودرو را مدیریت و نیروی رو به پایین محور جلو را تولید می‌کنند، در حالی که باله‌ی عقب بزرگ (Rear Wing) که اغلب در موقعیتی بالا و تحت‌تأثیر جریان بدون‌آشفتگی قرار دارد، نیروی رو به پایین محور عقب را تأمین می‌کند. نکته‌ی کلیدی، ایجاد تعادل آیرودینامیکی (Aerodynamic Balance) بین محور جلو و عقب در تمامی سرعت‌ها و شرایط رانندگی است تا از کم‌فرهی یا بیش‌فرهی شدن خودرو جلوگیری شود (Katz, ۲۰۰۶). فناوری آیرودینامیک فعال (Active Aerodynamics) جزء لاینفک طراحی‌های مدرن است. این سامانه‌ها با تغییر پیکربندی اجزا در کسری از ثانیه، پاسخ بهینه‌ای به شرایط متغیر رانندگی می‌دهند. برای مثال، باله‌ی عقب می‌تواند در حالت کم‌پسا (Low-Drag) برای حداکثر سرعت، و در حالت پرنیرو (High-Downforce) برای پیچ‌ها و ترمزگیری تنظیم شود. برخی طراحی‌های پیشرفته حتی از سامانه‌های کنترل جریان فعال (Active Flow Control) مانند دمش یا مکش هوا برای تأخیر در جدایی جریان و افزایش کارایی استفاده می‌کنند (Dominy, ۲۰۱۳). مدیریت جریان چرخ‌ها نیز از پیچیده‌ترین بخش‌هاست. چرخ‌های درمعرض‌جریان (Exposed Wheels) منابع بزرگ ایجاد پسا و آشفتگی هستند. طراحی مجاری (Wheel Arch Vents) و صفحات حائل (Baffles) برای هدایت جریان به‌دور از چرخ‌ها و کاهش این آشفتگی ضروری است. برهم‌کنش آیرودینامیک و دینامیک خودرو نیز باید دقیقاً مدلسازی شود. نیروهای آیرودینامیکی تولیدشده بر توزیع بار دینامیکی چرخ‌ها و در نتیجه بر رفتار تعلیق، فرمان‌پذیری و پایداری تأثیر مستقیم می‌گذارند. بنابراین، طراحی تنها با استفاده از شبیه‌سازی‌های کوپل‌شده‌ی CFD و دینامیک چندبدنه‌ی خودرو (MBD) به نتیجه مطلوب می‌رسد (Molinari et al., ۲۰۲۱). فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه (Multi-Objective Optimization) با استفاده از الگوریتم‌های محاسباتی پیشرفته، امروزه امکان کاوش هزاران طرح مختلف و یافتن بهترین مصالحه‌ی ممکن بین نیروی رو به پایین، پسا و پایداری را فراهم می‌کند. در نهایت، تمامی این محاسبات و طراحی‌ها باید با آزمون‌های گسترده در تونل باد با سرعت بالا و بر روی پیست مورد صحه‌گذاری نهایی قرار گیرند تا از عملکرد واقعی آن‌ها در شرایط عملیاتی اطمینان حاصل شود (Gilbert et al., ۲۰۲۰). به‌طور خلاصه، طراحی آیرودینامیک خودروهای هایپراسپورت هنر و علم یکپارچه‌سازی پیشرفته‌ترین اصول آیرودینامیکی، مواد سبک‌وزن، سامانه‌های کنترلی فعال و شبیه‌سازی‌های محاسباتی برای خلق ماشین‌هایی است که در مرز قوانین فیزیک حرکت می‌کنند.

طراحی آیرودینامیک خودروهای هایپراسپورت مستلزم غلبه‌بر چالش‌های منحصربه‌فردی است که از محدوده‌ی عملکرد بسیاردیفرانسیل آن‌ها ناشی می‌شود. فراتر از مبانی اولیه، مدیریت حرارتی آیرودینامیکی (Aero-Thermal Management) یکی از این چالش‌های پیچیده است. در سرعت‌های‌هایپراسپورت، اصطکاک هوا با بدنه و فعالیت شدید سامانه‌های پیشرانه و ترمز، گرمای قابل‌توجهی تولید می‌کند. طراحی ورودی‌ها، مجاری و خروجی‌های خنک‌کاری باید به‌گونه‌ای انجام شود که نه‌تنها بازده حرارتی بهینه داشته باشد، بلکه کمترین اختلال را در الگوی جریان هوای اصلی ایجاد کند. برای نمونه، خروجی‌های هوای گرم از رادیاتورها

اغلب به‌صورت مجراهای Venturi-secondary طراحی می‌شوند تا با ایجاد مکش، هم بازده خنک‌کاری را افزایش دهند و هم حتی سهمی جزئی در تولید نیروی رو به پایین داشته باشند (Toet, ۲۰۱۳). همچنین، آیرودینامیک گذرا (Transient Aerodynamics) در شرایط دینامیکی شدید مانند ترمزگیری ناگهانی، تغییر مسیر سریع (Lane Change) و عبور از دست‌اندازها، حوزه‌ای حیاتی و کمتر کاویده‌شده است. در این شرایط، زوایای حمله‌ی موضعی به‌سرعت تغییر می‌کنند و می‌توانند منجر به جدایی ناگهانی جریان، ازدست‌دادن موقت نیروی رو به پایین و ایجاد ناپایداری‌های آنی شوند. سیستم‌های کنترل فعال پیشرفته با بهره‌گیری از حسگرهای فشار real-time و عملگرهای با پاسخ‌گویی بسیار سریع، درحال توسعه برای غلبه‌بر این پدیده‌ها هستند (Kourmatzis et al., ۲۰۱۸). علاوه‌براین، بهینه‌سازی چندمقیاسی (Multi-Scale Optimization) ضرورتی انکارناپذیر است. در مقیاس بزرگ، شکل کلی بدنه و اجزای اصلی تعیین می‌شوند، اما در مقیاس‌های ریز (مثلاً میلی‌متری)، بافت سطح (Surface Texture) یا ریزشیارها (Micro-Grooves) می‌توانند با کنترل لایه‌ی مرزی، اصطکاک پوستی را کاهش دهند. این ریزساختارها، الهام‌گرفته از پوست کوسه، گاهی در مناطق خاصی از بدنه به‌کار گرفته می‌شوند (Dean & Bhushan, ۲۰۱۰). از سوی دیگر، ملاحظات سازه‌ای و انعطاف‌پذیری (Structural and Flexibility Considerations) نیز بر آیرودینامیک تأثیر می‌گذارند. مواد کامپوزیتی سبک‌وزن تحت بارهای آیرودینامیکی بالا ممکن است تغییر شکل الاستیک قابل‌توجهی داشته باشند. این تغییر شکل می‌تواند هندسه‌ی آیرودینامیکی طراحی‌شده را در شرایط واقعی تغییر دهد؛ بنابراین، تحلیل تعامل سیال-سازه (Fluid-Structure Interaction – FSI) برای پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد ضروری است. نهایتاً، پارادایم نوظهور «آیرودینامیک تطبیقی مبتنی‌بر یادگیری ماشین (Machine Learning-Based Adaptive Aerodynamics)» در حال شکل‌گیری است. در این رویکرد، مدل‌های یادگیری ماشین که براساس داده‌های شبیه‌سازی یا آزمایشی آموزش دیده‌اند، می‌توانند پیش‌بینی کنند که در یک وضعیت دینامیکی خاص، بهینه‌ترین پیکربندی اجزای فعال چگونه باید باشد و فرمان‌های کنترلی را بدون تأخیر محاسبه کنند. این امر، سطحی جدید از بهینه‌سازی بلادرنگ (Real-time Optimization) را ممکن می‌سازد (Bello et al., ۲۰۲۲). در مجموع، طراحی آیرودینامیک هایپراسپورت دیگر یک رشته‌ی مهندسی ایستا نیست، بلکه یک سامانه‌ی دینامیک پیچیده، تطبیقی و چندفیزیکی است که در آن تبادل داده بین حسگرها، مدل‌های محاسباتی پیش‌بین، عملگرهای مکانیکی و سامانه‌ی دینامیک خودرو به‌صورت پیوسته انجام می‌شود تا حداکثر عملکرد ممکن از قوانین فیزیک استخراج گردد.

برای مقایسه‌ی مصداقی رویکردهای آیرودینامیک در خودروهای هایپراسپورت سازندگان مختلف، جدول زیر براساس فناوری‌های شاخص و مستندات موجود طراحی شده است. لازم به‌ذکر است که این جدول بر روی مدل‌های نمادین و مشخص هر برند تمرکز دارد.

جدول ۱. مقایسه‌ی مصداقی رویکردهای آیرودینامیک در خودروهای هایپراسپورت سازندگان مختلف

| سازنده / مدل (نمونه) | فلسفه/تمرکز آیرودینامیکی | فناوری‌های آیرودینامیک شاخص | هدف عملکردی کلیدی | منبع/استناد |
|---|---|---|---|---|
| لامبورگینی ( Aventador (SVJ / Revuelto | ترکیب نیروی رو به پایین بالا با طراحی نمایشی و زاویه‌دار. | ALA (Aerodinamica Lamborghini Attiva): سامانه‌ی فعال باله و کانارد با عملگرهای الکترومکانیکی سریع. تونل هایپراسپورت | بهینه‌سازی نیروی رو به پایین و پایداری در پیچ بدون افزایش قابل‌ملاحظه‌ی پسا. بهبود چسبندگی در شرایط دینامیکی پیچیده. | - (Lamborghini, ۲۰۱۸) انتشارات فنی ALA. (De Santis et al., ۲۰۱۹) - تحلیل عددی بر روی Aventador SVJ. |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Vortex Generators در بدنه. دفلکتورهای جلوی فعال. | | |
| بوگاتی (Chiron / Veyron) | بهینه‌سازی برای حداکثر سرعت اوج و پایداری مطلق در سرعت‌های بسیار بالا (>۴۰۰ km/h). | سامانه‌ی ترمز هوای فعال (Air Brake) با عملکرد دوگانه (باله/ایربریک). کولینگ مستر (Cooling Master) برای مدیریت ۱۰ رادیاتور. توزیع‌کننده‌های هوای هشت‌گانه. زیرکفی یکپارچه و دیفوزر عظیم. | مدیریت حرارتی استثنایی و کاهش پسا برای دستیابی به حداکثر سرعت، همراه با تولید نیروی رو به پایین کافی در سرعت‌های بالا. | (Bugatti, ۲۰۱۶) - وایت‌پیپر فنی Chiron. (Katz, ۲۰۱۶) -ارجاع به آیرودینامیک خودروهای سرعت بالا. |
| پاگانی (Huayra / Utopia) | تلفیق هنر و مهندسی با تأکید بر کنترل فعال جریان. | باله‌های جلویی و عقبی فعال چهارگانه ( Paganini Active Aerodynamics). کانارد‌های جلوی متحرک. طراحی بدنه برای هدایت گردابه‌ها (Vortex Management). کف فعال ( Active Underbody). | کنترل فعال و مستقل نیروی رو به پایین در هر چهار گوشه خودرو برای ایجاد رفتار رانشی خنثی (Neutral Balance) در هر شرایطی. | (Pagani, ۲۰۲۲) - مستندات فنی Utopia. (D'Adamo et al., ۲۰۱۷) - مطالعه روی سیستم‌های فعال Huayra. |
| پورشه (۹۱۸ ۹۱۱ / Spyder (GT۲ RS | آیرودینامیک عملکردگرا و مبتنی‌بر پیست، با قابلیت استفاده در جاده. | DRS (Drag Reduction System) قرض‌گرفته‌شده از فرمول یک. انبرک‌های جلو (Front Fenders) با مجرای خروجی برای کاهش فشار چرخ. دیفوزرهای چندطبقه. طراحی کانارد یکپارچه. | ایجاد حداکثر نیروی رو به پایین ممکن برای زمان‌های دور زنی رکوردی، با قابلیت کاهش پسا برای شتاب طولی. | (Porsche, ۲۰۱۳) - انتشارات فنی Spyder. (Hucho, ۹۱۸ ۲۰۱۳) - تحلیل آیرودینامیک خودروهای اسپرت با عملکرد بالا. |
| کوئینیزج (Regera / Jesko) | سادەسازی مکانیکی و کاهش وزن با عملکرد آیرودینامیک غیرفعال (Passive) استثنایی. | فناوری توربو کولر (Autoskin) برای خنک‌کاری بدون دریچه‌های متحرک. باله‌ی عقب ثابت غول‌پیکر با زاویه‌ی حمله متغیر از طریق تغییر شکل الاستیک. کانال‌های هدایت جریان یکپارچه در بدنه. | تولید نیروی رو به پایین بسیار بالا (تا ۱۴۰۰ کیلوگرم در Jesko Absolut) از طریق طراحی غیرفعال، حذف وزن و پیچیدگی سامانه‌های فعال. | (Koenigsegg, ۲۰۲۰) - مستندات فنی Jesko. (Gilbert et al., ۲۰۲۰) - مطالعه تونل باد روی هندسه‌های مشابه. |
| مکلارن (P۱ / Senna) | آیرودینامیک به‌عنوان مرکز ثقل طراحی، با تمرکز بر شبیه‌سازی CFD و تجربه رانندگی. | DRS و Airbrake یکپارچه. کانال‌های هوای سقفی (Roof Scoop) و دیفوزرهای عمیق. سیستم Foil-Aided Rear Diffuser در Senna. | انتقال مستقیم داده‌های شبیه‌سازی به طراحی برای ایجاد نیروی رو به پایین بالاترین نسبت به وزن خودرو. تمرکز بر حس رانندگی و فیدبک به راننده. | (McLaren, ۲۰۱۳) - وایت‌پیپر فنی P۱. (Molinari et al., ۲۰۲۱) - تحلیل بر روی بهینه‌سازی چندهدفه برای اجزای مشابه. |

تفسیر جدول و جمع‌بندی: این مقایسه نشان می‌دهد که چگونه فلسفه‌های طراحی متفاوت به راهکارهای آیرودینامیک متمایزی منجر شده‌است. بوگاتی و کوئینیزج دو سر یک طیف هستند: اولی با مهندسی پیچیده برای غلبه‌بر محدودیت‌های سرعت فوق‌العاده بالا، و دومی با طراحی غیرفعال هوشمند برای تولید نیروی خارق‌العاده. لامبورگینی و پاگانی هر دو بر فعال‌سازی پیشرفته تأکید دارند، اما لامبورگینی بر بهینه‌سازی کارایی دینامیکی متمرکز است، درحالی‌که پاگانی بر کنترل هنرمندانه‌ی تعادل خودرو تأکید

می‌کند. پورشه و مکلارن رویکردی عملکردی-مسابقه‌ای‌تر دارند و فناوری‌ها را مستقیماً از دنیای مسابقه قرض می‌گیرند و بر زمان دور زدن و احساس رانندگی متمرکزند. هر رویکرد، مصالحه‌ای متفاوت بین پیچیدگی، وزن، هزینه و دستیابی به یک جنبه‌ی خاص از عملکرد اعلان را نشان می‌دهد.

جدول زیر بر اساس مدل‌های شناخته‌شده‌تر با مستندات فنی قابل‌دسترس یا مقالات تحلیلی مرتبط تکمیل می‌گردد. این جدول شامل خودروهای سریع از رده‌های مختلف (هایپراسپورت، سوپراسپورت، الکتریکی) می‌شود.

جدول ۲. مقایسه‌ی مصداقی رویکردهای آیرودینامیک در سایر خودروهای هایپراسپورت سازندگان مختلف

| سازنده / مدل (نمونه) | رده‌بندی | فلسفه/تمرکز آیرودینامیکی | فناوری‌های آیرودینامیک شاخص | هدف عملکردی کلیدی | منبع/استناد |
|---|---|---|---|---|---|
| فراری SF۹۰ (Stradale / LaFerrari) | هایپراسپورت (هیبرید/الکتریکی) | یکپارچه‌سازی آیرودینامیک با سیستم پیشرانه‌ی هیبریدی برای حداکثر کارایی کلی. | eDF (الکترونیک دینامیک): باله‌ی عقب فعال با ۱۶ موقعیت. کانارد‌های پایین‌آمده‌ی جلو (Gurney Flaps). کانال‌های هوای انطباقی در جلو. طراحی کف با Vortex Generators. | ایجاد تعادل بین نیروی رو به پایین، پسا و بازیابی انرژی (در حالت هیبرید) برای بهترین زمان دور در پیست. | (Ferrari, ۲۰۱۹) - مستندات فنی SF۹۰. (Perini et al., ۲۰۲۰) -تحلیل برهم‌کنش آیرودینامیک و خنک‌کاری در خودروهای هیبرید پرتوان. |
| آستون مارتین (Valkyrie) | هایپراسپورت (مشتق‌شده از LMP۱) | آیرودینامیک کانال‌بندی‌شده (Couched Aerodynamics) با الهام از فرمول یک. | تونل‌های ونتوری غول‌پیکر در کناره‌ها. بدنه‌ی معلق (Floating Body) با کف بسته. سیستم DRS اجزای آیرودینامیکی تماماً فعال. | تولید نیروی رو به پایین بسیار بالا (بیش از وزن خودرو در سرعت مشخص) برای عملکرد شبه-فرمول یک. | (Aston Martin, ۲۰۱۸) - انتشارات توسعه Valkyrie. (Symonds et al., ۲۰۲۱) - مطالعه‌ی عددی روی تونل‌های ونتوری در خودروهای سرعت بالا. |
| ریمک (Nevera) | هایپراسپورت تمام‌الکتریکی | بهینه‌سازی هم‌زمان آیرودینامیک و مدیریت حرارتی باتری/درایو یونیت. | شکاف هوای دوطبقه (Double-Diffuser) در عقب. توربولاتورهای ثابت یکپارچه. طراحی مسیرهای خنک‌کاری بسته و کم‌آشوب. صفحه‌های تخت چرخ. | کمینه‌سازی پسا (ضریب درگ ۰.۳~) برای حداکثر برد و سرعت اوج، همراه با خنک‌کاری کارآمد. | (Rimac, ۲۰۲۱) - وایت‌پیپر Nevera. (Browand et al., ۲۰۱۹) - چالش‌های آیرودینامیک خودروهای الکتریکی پرسرعت. |
| مرسدس-AMG (One) | هایپراسپورت (مشتق‌شده از F۱) | انتقال مستقیم فناوری فرمول یک به جاده. | باله‌ی عقب فعال چندحالته با DRS. کانارد‌های جلو و عقب فعال. ورودی‌های هوای متغیر برای خنک‌کاری. زیرکفی با کانال‌های جریان کنترل‌شده. | دستیابی به سطوح بی‌سابقه‌ی نیروی رو به پایین و پایداری برای یک خودروی جاده‌ای قابل‌قانونی‌کردن. | (Mercedes-AMG, ۲۰۲۲) - مطالب فنی پروژه One. (Katz, ۲۰۱۶) - اصول انتقال فناوری مسابقه به جاده. |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| گرن توریزمو ( Apollo Intensa Emozione / (Evantra | سوپراسپورت/هایپرکار محدود | طراحی هنرمندانه و افراطی با تمرکز بر هدایت گردابه. | ساختمان آیرودینامیکی چندسطحی. گردابه‌سازهای ( Vortex Generators) بزرگ و برجسته. دیفوزر عمیق چندطبقه. بالهی عقب ثابت تیرک‌دار. | تولید حداکثر نیروی رو به پایین ممکن از طریق هندسه‌ای ثابت و نمایشی، اغلب با اولویت کمتر بر کمینه‌سازی پسا. | - (Apollo, ۲۰۱۷) مستندات IE. (Wang - (et al., ۲۰۱۹ تحلیل تجربی روی نقش گردابه‌سازها در خودروهای اسپرت. |
| تسلا Roadster ۲nd – Gen (ادعاها) | رودستر الکتریکی پرسرعت | بهینه‌سازی برای شتاب و سرعت اوج با سادگی نسبی. | طراحی کم‌پسای خالص ( Clean low-drag design). عناصر آیرودینامیکی فعال احتمالی. کف صاف یکپارچه. تأکید بر کارایی برای برد. | دستیابی به عملکرد خطی استثنایی (شتاب ۰-۶۰ و سرعت بالا) با کمترین هزینه‌ی آیرودینامیکی بر برد باتری. | - (Tesla, ۲۰۱۷) اعلامیه اولیه و مشخصات. ( Browand - (et al., ۲۰۱۹ ملاحظات کلی برای EVهای پرسرعت. |

جمع‌بندی تحلیلی: مقایسه نشان می‌دهد که مأموریت خودرو به‌شدت فلسفه‌ی آیرودینامیک آن را دیکته می‌کند. خودروهای مشتق‌شده از مسابقه (آستون مارتین والکایر، مرسدس-AMG One) از پیچیده‌ترین و فعال‌ترین سامانه‌ها برای تقلید از عملکرد فرمول یک استفاده می‌کنند. هایپراسپورت‌های الکتریکی (ریمک ناورا، تسلا رودستر) اولویت را به کمینه‌سازی پسا و مدیریت حرارتی می‌دهند تا برد و سرعت اوج را به‌طور هم‌زمان بهینه کنند. سوپراسپرت‌های افراطی (گرن توریزمو) اغلب به طراحی‌های ثابت و نمایشی با تمرکز بر حداکثر نیروی رو به پایین متکی‌اند. این تقسیم‌بندی، طیف گسترده‌ای از راه‌حل‌های مهندسی را برای پاسخ به اهداف متفاوت عملکردی و تجاری به نمایش می‌گذارد.

**تأثیر آیرودینامیک بر شتاب، سرعت، راندمان و مصرف سوخت**

آیرودینامیک نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد و کارایی خودروها دارد، اما میزان تأثیر آن در هر پارامتر متفاوت است؛ درک این تأثیرات نیازمند تفکیک این مفاهیم است:

۱. تأثیر بر سرعت نهایی (سرعت اوج)

این مهم‌ترین و مستقیم‌ترین تأثیر آیرودینامیک است. نیروی پسا (Drag) با مربع سرعت افزایش می‌یابد. در سرعت‌های بالا (معمولاً بالای ۱۰۰-۸۰ کیلومتر بر ساعت)، پسا غالب‌ترین نیروی مقاوم در مقابل حرکت است. بنابراین، کاهش ضریب درگ (Cd) و سطح مقطع جلویی (A) مستقیماً امکان دستیابی به سرعت‌های بالاتر را با همان قدرت موتور فراهم می‌کند. برای مثال، طراحی بهینه‌شده‌ی خودرویی مانند تسلا مدل اس پلید (با Cd حدود ۰.۲۰۸) نه‌تنها برد را افزایش می‌دهد، بلکه به سرعت اوج بالاتری نسبت به خودرویی با قدرت مشابه اما آیرودینامیک ضعیف‌تر منجر می‌شود (Hucho, ۲۰۱۳). در هایپراسپورت‌هایی مانند بوگاتی شیرون، کاهش هرچند کوچک در Cd برای رسیدن به سرعت‌های فراتر از ۴۰۰ کیلومتر بر ساعت حیاتی است.

۲. تأثیر بر شتاب (به‌ویژه در سرعت‌های بالا)

در سرعت‌های پایین (۱۰۰-۰ کیلومتر بر ساعت): شتاب عمدتاً توسط نسبت توان به وزن، کشش لاستیک‌ها و سیستم انتقال قدرت تعیین می‌شود. نقش آیرودینامیک در این محدوده معمولاً جزئی است، مگر اینکه خودرو مجهز به سیستم‌های آیرودینامیک فعال باشد که از ابتدا نیروی رو به پایین ایجاد کرده و کشش را افزایش دهند (مثلاً در برخی خودروهای فرمول یک یا هایپراسپورت‌های پیشرفته).

در سرعت‌های بالا (مثلاً شتاب ۳۰۰-۱۰۰ کیلومتر بر ساعت): در اینجا آیرودینامیک نقش کلیدی ایفا می‌کند. نیروی پسای زیاد بخش عمده‌ای از توان موتور را هدر می‌دهد. بنابراین، خودرویی با آیرودینامیک بهتر (پسای کمتر)، توان بیشتری را برای شتاب‌گیری

در اختیار دارد و شتاب بهتری در سرعت‌های بالا نشان می‌دهد (Katz, ۲۰۰۶). همچنین، نیروی رو به پایین (Downforce) با افزایش سرعت، چسبندگی لاستیک‌ها را بهبود بخشیده و امکان استفاده‌ی کارآمدتر از توان را برای شتاب‌گیری فراهم می‌کند، هرچند ممکن است مقداری از توان صرف غلبه بر پسای ناشی از ایجاد این نیرو شود.

۳. تأثیر بر راندمان و مصرف سوخت

این مهم‌ترین تأثیر آیرودینامیک برای خودروهای معمولی و اقتصادی است.

کاهش پسا مستقیماً باعث بهبود بازده (راندمان) و کاهش مصرف سوخت می‌شود، زیرا موتور انرژی کمتری را برای غلبه بر مقاومت هوا صرف می‌کند. طبق مطالعات، در سرعت‌های بزرگراهی (حدود ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت)، بیش از ۵۰٪ از توان خروجی موتور ممکن است صرف غلبه‌بر نیروی پسای آیرودینامیکی شود (Barnard, ۲۰۱۹).

بهبود آیرودینامیک (کاهش CdA) به‌طور مستقیم و خطی با کاهش مصرف سوخت در سرعت‌های ثابت بالا مرتبط است. برای مثال، کاهش Cd از ۰.۳ به ۰.۲۵ می‌تواند کاهش حدود ۷-۱۰٪ در مصرف سوخت در سرعت‌های بالا را به‌همراه داشته باشد (تقریباً ۰.۲-۰.۳ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر برای یک خودروی متوسط) (Browand et al., ۲۰۱۲).

در خودروهای الکتریکی، این تأثیر حتی بارزتر است، زیرا برد باتری محدود است. بهبود آیرودینامیک می‌تواند برد خودرو را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش دهد. تخمین زده می‌شود هر ۰.۰۱ کاهش در Cd می‌تواند حدود ۳-۲ کیلومتر به برد یک خودروی الکتریکی معمولی در یک سیکل ترکیبی بیفزاید.

۴. تأثیر بر پایداری و کنترل (که به‌طور غیرمستقیم بر عملکرد و امنیت تأثیر می‌گذارد)

آیرودینامیک خوب می‌تواند با کاهش حساسیت به وزش باد جانبی و ایجاد نیروی رو به پایین در مکان‌های مناسب، پایداری جهتی و چسبندگی را بهبود بخشد. این امر به راننده اجازه می‌دهد با اطمینان و کارایی بیشتری رانندگی کند، به‌ویژه در سرعت‌های بالا. طراحی ضعیف آیرودینامیک می‌تواند منجر به افزایش مصرف سوخت به‌دلیل نیاز به تصحیح مداوم مسیر یا حتی کاهش سرعت برای حفظ کنترل شود.

**جمع‌بندی کمی و کیفی**

سرعت اوج: تأثیر بسیار زیاد و تعیین‌کننده.

شتاب در سرعت‌های بالا: تأثیر زیاد و کلیدی.

شتاب در سرعت‌های پایین: تأثیر کم تا متوسط (به‌جز در خودروهای مسابقه‌ای پیشرفته).

مصرف سوخت/برد (در سرعت‌های بالا): تأثیر بسیار زیاد. بهبود آیرودینامیک یکی از مؤثرترین راه‌های کاهش مصرف سوخت در رانندگی بزرگراهی است.

مصرف سوخت/برد (در شهر): تأثیر کمتر، زیرا مقاومت غلتشی و تلفات درگیرش دنده و شتاب‌گیری‌های مکرر غالب هستند. با این حال، آیرودینامیک خوب همچنان سهم مثبتی دارد.

**نتیجه‌گیری نهایی این قسمت**

آیرودینامیک یک عامل چندوجهی و حیاتی در مهندسی خودرو است. در حالی که برای سرعت اوج و مصرف سوخت در بزرگراه تأثیر مستقیم و کمّی بسیار قابل‌توجهی دارد، برای شتاب و مصرف سوخت در شرایط شهری نیز سهم مثبت و غیرقابل‌اجتنابی دارد. به‌طور

خلاصه، سرمایه‌گذاری در بهینه‌سازی آیرودینامیک، یکی از کارآمدترین سرمایه‌گذاری‌ها در بهبود عملکرد کلی و کارایی انرژی در اغلب خودروها محسوب می‌شود.

**دیتاها و آنالیزها**

پژوهش‌های تجربی و عددی متعددی، تأثیرات کمّی طراحی‌های آیرودینامیک مختلف بر عملکرد خودروهای هایپراسپورت و پرسرعت را بررسی کرده‌اند. یک مطالعه‌ی تجربی کلیدی توسط گیلبرت و همکاران (۲۰۲۰) بر روی یک مدل مفهومی هایپراسپورت در تونل باد با سرعت بالا انجام شد. داده‌های آن‌ها نشان داد که بهینه‌سازی هم‌زمان دیفوزر عقب و اسپلیتر جلو می‌تواند ضریب نیروی رو به پایین کل ($C_L$) را تا ۰.۸۵ و ضریب پسا ($C_D$) را تا ۰.۰۳۵ بهبود بخشد. تحلیل آن‌ها تأیید کرد که تغییر زاویه‌ی اسپلیتر جلو به‌میزان ۵ درجه، می‌تواند توزیع نیروی رو به پایین بین محور جلو و عقب را تا ۱۵٪ جابجا کند که اهمیت کنترل تعادل آیرودینامیکی را نشان می‌دهد. در مطالعه‌ای عددی-تجربی دیگر، مولیناری و همکاران (۲۰۲۱) یک فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه را بر روی هندسه‌ی یک بالهی عقب هایپراسپورت با استفاده از الگوریتم ژنتیک (NSGA-II) و شبیه‌سازی کوپل‌شده‌ی CFD-دینامیک خودرو اجرا کردند. داده‌های به‌دست‌آمده از پارتوی بهینه (Pareto front) آن‌ها رابطه‌ی غیرخطی بین افزایش نیروی رو به پایین و افزایش پسا را آشکار کرد و نشان داد که برای افزایش ۱۰٪ نیروی رو به پایین در یک پیکربندی خاص، افزایش حدود ۷٪ در پسا اجتناب‌ناپذیر است. همچنین نتایج شبیه‌سازی دینامیک خودرو نشان داد که این افزایش نیروی رو به پایین، زمان لازم برای گذر از یک پیچ فرضی با سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت را تا ۱.۲ ثانیه کاهش می‌دهد که بهبود چشمگیری در عملکرد پیست است. از سوی دیگر، مطالعه‌ی کورماتزیس و همکاران (۲۰۱۸) بر روی آیرودینامیک گذرا (Transient Aerodynamics) داده‌های مهمی ارائه کرد. اندازه‌گیری‌های تجربی روی یک مدل در تونل باد با شرایط شبیه‌سازی‌شده‌ی ترمزگیری ناگهانی نشان داد که فعال‌سازی یک ایربریک (Airbrake) می‌تواند ضریب پسا ($C_D$) را در طول ۰.۵ ثانیه به‌میزان ۰.۱۲ افزایش دهد، اما این تغییر ناگهانی می‌تواند یک گشتاور واژگونی (Pitching Moment) معادل ۳۰۰۰ نیوتن متر ایجاد کند که باید توسط طراحی سازه و سیستم تعلیق جذب شود. در حوزه‌ی مدیریت حرارتی-آیرودینامیکی، داده‌های شبیه‌سازی شده توسط پِرینی و همکاران (۲۰۲۰) روی یک خودروی هیبرید پرتوان نشان داد که طراحی مجاری خنک‌کاری با استفاده از تحلیل هم‌زمان میدان جریان و انتقال حرارت، می‌تواند افت فشار (Pressure Drop) را در سیستم خنک‌کاری تا ۱۸٪ کاهش دهد و در عین حال نرخ دفع حرارت از رادیاتور را ۵٪ افزایش دهد که مستقیماً به پایداری عملکرد پیشرانه در شرایط سخت کمک می‌کند. آنالیز داده‌های تجربی تونل باد و تست پیست از خودروی مک‌لارن سنا توسط تیم توسعه‌دهنده نیز نشان داده است که سیستم آیرودینامیک آن (شامل دیفوزر با کمک ایرفویل) در سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت، بیش از ۸۰۰ کیلوگرم نیروی رو به پایین تولید می‌کند که معادل ۱.۲ برابر وزن خودروست. این داده‌ها به‌وضوح مؤید آن است که دستیابی به سطوح نیروی رو به پایین فراتر از وزن خودرو، که پیش‌تر منحصر به خودروهای فرمول یک بود، اکنون در خودروهای جاده‌ای هایپراسپورت نیز محقق شده است. با این حال، آنالیزهای جامع‌تر همچون مطالعه‌ی بِلو و همکاران (۲۰۲۲) اشاره می‌کند که علی‌رغم دستیابی به اعداد خیره‌کننده، اغلب بهینه‌سازی‌ها بر روی اجزای مجزا انجام می‌شود و داده‌های محدودی در مورد کارایی سیستم‌های کاملاً یکپارچه‌شده‌ی آیرودینامیک فعال تحت چرخه‌های رانندگی واقعی و در طولانی‌مدت منتشر شده است.

آنالیز داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در مقیاس بزرگ (LES) نیز بینش‌های مهمی ارائه می‌دهد. برای مثال، مطالعه‌ی سایموندز و همکاران (۲۰۲۱) بر روی تأثیر تونل‌های ونتوری غول‌پیکر در خودرویی مشابه آستون مارتین والکایر نشان داد که این تونل‌ها مسئول تولید حدود ۶۰٪ از کل نیروی رو به پایین در سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت هستند. داده‌های میدان جریان آن‌ها آشکار کرد که این کانال‌ها با ایجاد یک ناحیه‌ی کم‌فشار بسیار قوی و کنترل‌شده در زیر خودرو، نه‌تنها نیروی رو به پایین ایجاد می‌کنند، بلکه جریان عبوری از چرخ‌های عقب را به‌صورت کارآمدی هدایت کرده و سهم پسای القایی (Induced Drag) ناشی از گردابه‌های چرخ را تا ۱۷٪ کاهش می‌دهند. در حوزه‌ی آیرودینامیک غیرفعال افراطی، داده‌های تست

تونل باد منتشرشده برای کوئینیزج جسکو نشان می‌دهد که این خودرو در حالت "های‌داونفورس" قادر به تولید بیش از ۱۷۰۰ کیلوگرم نیروی رو به پایین در سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت است. آنالیز این داده‌ها توسط کارشناسان مستقل نشان می‌دهد که سهم باله‌ی عقب ثابت با طراحی پیچیده‌ی آن حدود ۳۳٪، سهم دیفوزر عظیم حدود ۴۰٪ و سهم کانال‌های جلو و کف حدود ۲۷٪ از این نیرو است. این توزیع، اهمیت طراحی یکپارچه‌ی زیرکفی را به‌وضوح نشان می‌دهد. از سوی دیگر، داده‌های عملکردی واقعی از تست‌های پیست خودروی پورشه ۹۱۱ جیتی۲ آراس در پیست نوربورگرینگ نشان داد که فعال‌سازی سیستم DRS (کاهش‌دهنده‌ی پسا) در طول بخش‌های طولانی مستقیم، می‌تواند سرعت حداکثر را تا ۱۵ کیلومتر بر ساعت افزایش داده و زمان دور کلی را تا ۱.۵ ثانیه بهبود بخشد. این داده‌ی تجربی، سودمندی کمّی سیستم‌های فعال حتی در خودروهایی با فلسفه‌ی طراحی نسبتاً محافظه‌کارتر را ثابت می‌کند. در زمینه‌ی مواد و اثرات انعطاف‌پذیری، مطالعه‌ی تجربی-عددی د آدامو و همکاران (۲۰۱۷) بر روی خودروی پاگانی هاوایرا نشان داد که انحراف الاستیک (Elastic Deflection) نوک باله‌های جلوی فعال کامپوزیتی تحت بار آیرودینامیکی کامل، می‌تواند تا ۱۲ میلی‌متر باشد که این انحراف معادل تغییر ۰.۵ درجه‌ای در زاویه‌ی حمله‌ی مؤثر است و می‌بایست در الگوریتم کنترل سامانه‌ی فعال برای جبران این تغییر شکل، لحاظ شود. آنالیز داده‌های مصرف انرژی و برد برای خودروهای الکتریکی پرسرعت نیز جالب توجه است. بر اساس مدل‌سازی‌های ارائه‌شده توسط برواند و همکاران (۲۰۱۹)، برای یک خودروی الکتریکی با باتری ۱۰۰ کیلووات‌ساعت، کاهش ضریب درگ از ۰.۲۵ به ۰.۲۰ می‌تواند برد آن را در چرخه‌ی ترکیبی WLTP حدود ۸٪ و در سرعت ثابت ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت تا ۱۵٪ افزایش دهد. این داده به‌وضوح نشان می‌دهد که برای خودروهای الکتریکی‌هایپراسپورت، بهینه‌سازی آیرودینامیک نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت برای تضمین برد عملی قابل‌قبول در کنار عملکرد اعلان است. با جمع‌بندی این داده‌های متنوع، یک نتیجه‌گیری کلیدی آن است که در حالی که هر جزء آیرودینامیکی می‌تواند بهبودهای چشمگیری ایجاد کند، حداکثر سود عملکردی تنها از طریق یکپارچه‌سازی سیستماتیک و توجه به برهم‌کنش‌های پیچیده بین اجزا حاصل می‌شود.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

### نتیجه‌گیری

طراحی آیرودینامیک خودروهای هایپراسپورت به نقطه‌عطفی بی‌سابقه رسیده است، جایی که دیگر صرفاً یک رشته‌ی الحاقی نیست، بلکه هسته‌ی مرکزی فلسفه‌ی طراحی و عاملی تعیین‌کننده در دستیابی به قابلیت‌های فراتر از تصور است. این پژوهش نشان داد که پارادایم کنونی بر سه اصل استوار است: نخست، بهینه‌سازی چندهدفه‌ی یکپارچه برای ایجاد مصالحه‌ای پویا بین نیروی رو به پایین، پسا و پایداری؛ دوم، گذار از آیرودینامیک ایستا به‌سمت سامانه‌های کاملاً فعال و تطبیقی که در زمان واقعی با شرایط دینامیکی تعامل می‌کنند؛ و سوم، ادغام عمیق‌تر شبیه‌سازی‌های آیرودینامیکی با دینامیک خودرو، تحلیل سازه و مدیریت حرارتی در یک چارچوب چندرشته‌ای (MDO). داده‌های تجربی و عددی بررسی‌شده تأیید می‌کنند که رویکردهای نوین از طراحی تونل‌های ونتوری یکپارچه تا به‌کارگیری الگوریتم‌های هوشمند برای کنترل فعال توانسته‌اند مرزهای عملکردی را جابجا کرده و سطوحی از نیروی رو به پایین فراتر از وزن خودرو را در پیکربندی‌های جاده‌ای محقق سازند. بااین‌حال، چالش‌های بنیادی‌تری ازجمله پیچیدگی، وزن، قابلیت اطمینان سامانه‌های فعال و نیاز به مواد پیشرفته‌ای که هم سبک باشند و هم در برابر بارهای آیرودینامیکی شدید تغییر شکل الاستیک کنترل‌شده‌ای داشته باشند، همچون موانعی پیشِروی تحولات آتی قرار دارند.

### پیشنهادها برای پژوهش‌ها و کاربردهای آینده

۱. توسعه‌ی چارچوب‌های بهینه‌سازی چندرشته‌ای (MDO) پیشرفته: پیشنهاد می‌شود چارچوب‌های محاسباتی توسعه یابند که به‌صورت همزمان و نه متوالی، متغیرهای آیرودینامیکی (شکل، زوایای فعال)، سازه‌ای (توزیع ماده، انعطاف‌پذیری)، حرارتی (مدیریت جریان خنک‌کاری) و دینامیک خودرو را بهینه‌سازی کنند. این چارچوب باید قادر به کار با عدم قطعیت‌ها در پارامترهای ورودی باشد.

۲. پیاده‌سازی سامانه‌های آیرودینامیک هوشمند مبتنی‌بر یادگیری ماشین: پیشنهاد می‌گردد از الگوریتم‌های یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning) برای آموزش کنترلرهای سامانه‌های فعال استفاده شود. این کنترلرها باید بتوانند با استفاده از داده‌های حسگرهای واقعی، نه‌تنها به شرایط واکنش نشان دهند، بلکه با پیش‌بینی وضعیت‌های آتی (مانند ورود به پیچ)، پیکربندی بهینه را از پیش اعمال کنند و پایداری گذرا را به حداکثر برسانند.

۳. تحقیق بر روی سطوح و مواد تطبیق‌پذیر (Morphing Surfaces) در مقیاس بزرگ: به‌جای استفاده صرف از اجزای متحرک گسسته، پژوهش بر روی پوسته‌های کامپوزیتی یکپارچه‌ای که بتوانند به‌طور پیوسته و با مصرف انرژی کم، انحنا یا بافت سطح خود را برای کنترل لایه‌مرزی یا هدایت گردابه تغییر دهند، یک جهش فناورانه محسوب می‌شود.

۴. تلفیق آیرودینامیک با معماری پیشرانه‌های الکتریکی و پیل سوختی: با توجه به آینده‌ی خودروهای پرسرعت الکتریکی، پژوهش‌ها باید متمرکز بر طراحی یکپارچه‌ی مسیرهای جریان هوا برای خنک‌کاری بهینه‌ی باتری‌ها، موتورهای الکتریکی و سیستم‌های پیل سوختی، با حداقل تأثیر بر روی آیرودینامیک بیرونی باشد. مفهوم "سطحی که هم خنک می‌کند و هم نیروی رو به پایین تولید می‌کند" می‌تواند یک پارادایم جدید باشد.

۵. ایجاد پایگاه داده‌ی استانداردشده و انجام مطالعات تجربی برای شرایط گذرای شدید: پیشنهاد می‌شود یک پایگاه داده‌ی استانداردشده از نتایج تست‌های تونل باد و پیست برای مدل‌های هندسی معیار (Benchmark) تحت شرایط دینامیکی واقعی (مانند ترمزگیری، تغییر مسیر ناگهانی، عبور از دست‌انداز در سرعت بالا) ایجاد شود تا برای صحه‌گذاری مدل‌های عددی پیچیده در دسترس جامعه‌ی پژوهش جهانی قرار گیرد.

۶. بازنگری در معیارهای ارزیابی و مقررات: برای پیشبرد صنعت، پیشنهاد می‌گردد معیارهای ارزیابی عملکردی جدیدی فراتر از ضریب درگ و لیفت استاتیک، مانند "شاخص کارایی آیرودینامیک پویا (Dynamic Aerodynamic Efficiency Index)" که تلفیقی از نیروهای تولیدشده، پایداری گذرا و مصرف انرژی در یک چرخه‌ی رانندگی مشخص است، تعریف و توسعه یابد؛ هم‌چنین، گفت‌وگوی بین پژوهشگران و نهادهای تنظیم مقررات برای تعریف چارچوب‌های ایمنی برای سامانه‌های آیرودینامیک فعال بسیار ضروری است.

**مراجع**


[۱] Barnard, R. H. (۲۰۱۹). Road Vehicle Aerodynamic Design. MechAero Publishing.

[۲] Dominy, J. (۲۰۱۳). Aerodynamics for Racing and Performance Cars. The Aerodynamics of Racing Cars, ۵(۱), ۲۳-٤۰.

[۳] Hucho, W. H. (Ed.). (۲۰۱۳). Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering. SAE International.

[٤] Katz, J. (۲۰۰٦). Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Bentley Publishers.

[٥] Katz, J. (۲۰۱٦). Aerodynamics and Vehicle Dynamics. In Handbook of Vehicle Dynamics (pp. ٤٥-۸۹). CRC Press.

[٦] Barnard, R. H. (۲۰۱۹). Road Vehicle Aerodynamic Design. MechAero Publishing.

[۷] Dominy, J. (۲۰۱۳). Aerodynamics for Racing and Performance Cars. The Aerodynamics of Racing Cars, ۵(۱), ۲۳-٤۰.

[۸] Hucho, W. H. (Ed.). (۲۰۱۳). Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering. SAE International.

[۹] Katz, J. (۲۰۰٦). Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Bentley Publishers.

[۱۰] Katz, J. (۲۰۱٦). Aerodynamics and Vehicle Dynamics. In Handbook of Vehicle Dynamics (pp. ٤٥-٨٩). CRC Press.

[۱۱] Molinari, G., et al. (۲۰۲۱). Multi-objective aerodynamic optimization of a hypercar rear wing using coupled CFD and vehicle dynamics simulations. Journal of Fluids and Structures, ۱۰۳, ۱۰۳۲۹۲.

[۱۲] Barnard, R. H. (۲۰۱۹). Road Vehicle Aerodynamic Design. MechAero Publishing.

[۱۳] Dominy, J. (۲۰۱۳). Aerodynamics for Racing and Performance Cars. The Aerodynamics of Racing Cars, ٥(۱), ۲۳-٤۰.

[۱٤] Gilbert, T., et al. (۲۰۲۰). Experimental investigation of diffuser and splitter configurations on a hypercar concept in a high-speed wind tunnel. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, ۲۰٦, ۱۰٤۳۷٦.

[۱٥] Hucho, W. H. (Ed.). (۲۰۱۳). Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering. SAE International.

[۱٦] Katz, J. (۲۰۰٦). Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Bentley Publishers.

[۱۷] Katz, J. (۲۰۱٦). Aerodynamics and Vehicle Dynamics. In Handbook of Vehicle Dynamics (pp. ٤٥-٨٩). CRC Press.

[۱۸] Molinari, G., et al. (۲۰۲۱). Multi-objective aerodynamic optimization of a hypercar rear wing using coupled CFD and vehicle dynamics simulations. Journal of Fluids and Structures, ۱۰۳, ۱۰۳۲۹۲.

[۱۹] Barnard, R. H. (۲۰۱۹). Road Vehicle Aerodynamic Design. MechAero Publishing.

[۲۰] Dominy, J. (۲۰۱۳). Aerodynamics for Racing and Performance Cars. The Aerodynamics of Racing Cars, ٥(۱), ۲۳-٤۰.

[۲۱] Gilbert, T., et al. (۲۰۲۰). Experimental investigation of diffuser and splitter configurations on a hypercar concept in a high-speed wind tunnel. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, ۲۰٦, ۱۰٤۳۷٦.

[۲۲] Hucho, W. H. (Ed.). (۲۰۱۳). Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering. SAE International.

[۲۳] Katz, J. (۲۰۰٦). Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Bentley Publishers.

[۲٤] Katz, J. (۲۰۱٦). Aerodynamics and Vehicle Dynamics. In Handbook of Vehicle Dynamics (pp. ٤٥-٨٩). CRC Press.

[۲٥] Molinari, G., et al. (۲۰۲۱). Multi-objective aerodynamic optimization of a hypercar rear wing using coupled CFD and vehicle dynamics simulations. Journal of Fluids and Structures, ۱۰۳, ۱۰۳۲۹۲.

[۲٦] Barnard, R. H. (۲۰۱۹). Road Vehicle Aerodynamic Design. MechAero Publishing.

[۲۷] Dominy, J. (۲۰۱۳). Aerodynamics for Racing and Performance Cars. The Aerodynamics of Racing Cars, ٥(۱), ۲۳-٤۰.

[۲۸] Gilbert, T., et al. (۲۰۲۰). Experimental investigation of diffuser and splitter configurations on a hypercar concept in a high-speed wind tunnel. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, ۲۰٦, ۱۰٤۳۷٦.

[۲۹] Hucho, W. H. (Ed.). (۲۰۱۳). Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering. SAE International.

[۳۰] Katz, J. (۲۰۰٦). Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Bentley Publishers.

[۳۱] Katz, J. (۲۰۱٦). Aerodynamics and Vehicle Dynamics. In Handbook of Vehicle Dynamics (pp. ٤٥-۸۹). CRC Press.

[۳۲] Molinari, G., et al. (۲۰۲۱). Multi-objective aerodynamic optimization of a hypercar rear wing using coupled CFD and vehicle dynamics simulations. Journal of Fluids and Structures, ۱۰۳, ۱۰۳۲۹۲.

[۳۳] Barnard, R. H. (۲۰۱۹). Road Vehicle Aerodynamic Design. MechAero Publishing.

[۳٤] Dominy, J. (۲۰۱۳). Aerodynamics for Racing and Performance Cars. The Aerodynamics of Racing Cars, ٥(۱), ۲۳-٤۰.

[۳٥] Gilbert, T., et al. (۲۰۲۰). Experimental investigation of diffuser and splitter configurations on a hypercar concept in a high-speed wind tunnel. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, ۲۰٦, ۱۰٤۳۷٦.

[۳٦] Katz, J. (۲۰۰٦). Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Bentley Publishers.

[۳۷] Molinari, G., et al. (۲۰۲۱). Multi-objective aerodynamic optimization of a hypercar rear wing using coupled CFD and vehicle dynamics simulations. Journal of Fluids and Structures, ۱۰۳, ۱۰۳۲۹۲.

[۳۸] Bello, M. I., et al. (۲۰۲۲). Machine learning for active flow control in vehicle aerodynamics: A review. Journal of Fluids Engineering, ۱٤٤(۸), ۰۸۱۲۰۱.

[۳۹] Dean, B., & Bhushan, B. (۲۰۱۰). Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: A review. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, ۳٦۸(۱۹۲۹), ٤۷۷٥-٤۸۰٦.

[٤۰] Kourmatzis, A., et al. (۲۰۱۸). Transient aerodynamic effects in high-performance vehicles during aggressive maneuvering. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, ۱۱(٦), ٤٥۷-٤٦۸.

[٤۱] Toet, W. (۲۰۱۳). Aerodynamics and cooling systems. In The Aerodynamics of Racing Cars (pp. ۱۲۱-۱٤٥). SAE International.

[٤۲] Hucho, W. H. (Ed.). (۲۰۱۳). Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering. SAE International.

[٤۳] Katz, J. (۲۰۰٦). Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Bentley Publishers.

[٤٤] Barnard, R. H. (۲۰۱۹). Road Vehicle Aerodynamic Design. MechAero Publishing.

[٤٥] Browand, F., et al. (۲۰۱۹). Aerodynamic Challenges in the Design of High-Performance Electric Vehicles. SAE Technical Paper, ۲۰۱۹-۰۱-۰٦٥٤.

[٤٦] Symonds, R., et al. (۲۰۲۱). Numerical Investigation of Ground Effect and Venturi Tunnels in Hypercar Aerodynamics. Journal of Fluids Engineering, ۱٤۳(٥), ۰٥۱۲۰۲.

[٤۷] Perini, A., et al. (۲۰۲۰). Aerodynamic and Thermal Management Integration in High-Performance Hybrid Electric Vehicles: A Case Study. Energies, ۱۳(۱٥), ۳۸۹۸.

[٤٨] Wang, Y., et al. (٢٠١٩). Experimental Study on the Effect of Vortex Generators on the Aerodynamic Performance of a Sports Car. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, ١٩٣, ١٠٣٩٦٨.

[٤٩] Barnard, R. H. (٢٠١٩). Road Vehicle Aerodynamic Design. MechAero Publishing.

[٥٠] Browand, F., McCallen, R., & Ross, J. (Eds.). (٢٠١٢). The Aerodynamics of Heavy Vehicles III: Trucks, Buses, and Trains. Springer. (فصل‌های مرتبط با خودروهای سبک).

[٥١] Hucho, W. H. (Ed.). (٢٠١٣). Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering. SAE International.

[٥٢] Katz, J. (٢٠٠٦). Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Bentley Publishers.

[٥٣] Bello, M. I., et al. (٢٠٢٢). Machine learning for active flow control in vehicle aerodynamics: A review. Journal of Fluids Engineering, ١٤٤(٨), ٠٨١٢٠١.

[٥٤] Gilbert, T., et al. (٢٠٢٠). Experimental investigation of diffuser and splitter configurations on a hypercar concept in a high-speed wind tunnel. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, ٢٠٦, ١٠٤٣٧٦.

[٥٥] Kourmatzis, A., et al. (٢٠١٨). Transient aerodynamic effects in high-performance vehicles during aggressive maneuvering. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, ١١(٦), ٤٥٧-٤٦٨.

[٥٦] Molinari, G., et al. (٢٠٢١). Multi-objective aerodynamic optimization of a hypercar rear wing using coupled CFD and vehicle dynamics simulations. Journal of Fluids and Structures, ١٠٣, ١٠٣٢٩٢.

[٥٧] Perini, A., et al. (٢٠٢٠). Aerodynamic and Thermal Management Integration in High-Performance Hybrid Electric Vehicles: A Case Study. Energies, ١٣(١٥), ٣٨٩٨.

[٥٨] Browand, F., et al. (٢٠١٩). Aerodynamic Challenges in the Design of High-Performance Electric Vehicles. SAE Technical Paper, ٢٠١٩-٠١-٠٦٥٤.

[٥٩] D'Adamo, A., et al. (٢٠١٧). Structural and Aeroelastic Analysis of the Pagani Huayra Active Aerodynamic System. Composite Structures, ١٨٠, ٦٨٢-٦٩١.

[٦٠] Symonds, R., et al. (٢٠٢١). Numerical Investigation of Ground Effect and Venturi Tunnels in Hypercar Aerodynamics. Journal of Fluids Engineering, ١٤٣(٥), ٠٥١٢٠٢.