

بهینه‌سازی طراحی توربین‌های بادی: چالش‌ها و راهکارها

محسن بناوند

گروه مهندسی مکانیک، واحد ارومیه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

چکیده

بهینه‌سازی طراحی توربین‌های بادی یکی از چالش‌های اصلی در صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر به شمار می‌رود. مهندسان و محققان با مشکلات متعددی روبرو هستند، از جمله بهبود کارایی هیدرودینامیکی پره‌ها، کاهش هزینه‌های تولید و نگهداری، و افزایش طول عمر تجهیزات. تغییرات اقلیمی، تنوع در شرایط جغرافیایی، و نیاز به سازگاری با زیست‌محیط نیز بر پیچیدگی این فرآیند می‌افزایند. برای حل این مسائل، استفاده از مدل‌سازی‌های پیشرفته و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی کمک کند و درک بهتری از رفتار سیستم تحت شرایط مختلف ارائه دهد. در راستای این چالش‌ها، راهکارهای نوآورانه‌ای مانند استفاده از مواد سبک و مقاوم، طراحی پره‌های قابل تنظیم، و فناوری‌های هوش مصنوعی به میان آمده‌اند. این تکنیک‌ها نه تنها به بهبود عملکرد توربین‌ها کمک می‌کنند، بلکه می‌توانند هزینه‌های عملیاتی را نیز کاهش دهند. به‌علاوه، همکاری‌های بین‌المللی و تحقیق و توسعه مشترک در این حوزه می‌تواند به تبادل دانش و تجربیات منجر شود و روند پیشرفت را تسریع بخشد. در نهایت، ارتقاء سطح آگاهی عمومی و اجتماعی درباره اهمیت انرژی‌های تجدیدپذیر نیز می‌تواند به افزایش سرمایه‌گذاری و رشد این صنعت یاری رساند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی طراحی، توربین‌های بادی، انرژی‌های تجدیدپذیر، کارایی هیدرودینامیکی

مقدمه

در دنیای امروز، انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان یک راه حل پایدار برای چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از مهم‌ترین منابع تجدیدپذیر، انرژی باد است که با استفاده از توربین‌های بادی به الکتریسیته تبدیل می‌شود. با توجه به رشد روزافزون تقاضا برای انرژی پاک و افزایش آگاهی از تغییرات اقلیمی، بهینه‌سازی طراحی توربین‌های بادی به یک ضرورت تبدیل شده است. این مقاله به بررسی چالش‌های موجود در طراحی توربین‌های بادی و راهکارهای مؤثر برای بهبود عملکرد آن‌ها می‌پردازد. از جمله موضوعات مهمی که مورد بحث قرار خواهد گرفت، شامل تأثیرات محیطی، هزینه‌های تولید، انتخاب مواد، طراحی هندسی و بهینه‌سازی عملکرد می‌باشد [1].

در این راستا، بررسی تأثیرات محیطی توربین‌های بادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در حالی که این فناوری به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند، اما ممکن است تأثیراتی بر روی اکوسیستم‌های محلی و حیات وحش داشته باشد. به عنوان مثال، مکان‌یابی نامناسب توربین‌ها می‌تواند منجر به آسیب به زیستگاه پرندگان و دیگر جانوران شود. بنابراین، ارزیابی دقیق زیست‌محیطی قبل از نصب این سازه‌ها، امری حیاتی است که باید به دقت انجام گیرد. علاوه بر این، هزینه‌های تولید و نصب توربین‌های بادی نیز چالشی اساسی به شمار می‌رود. با وجود پیشرفت‌های فناوری، هزینه‌های اولیه می‌تواند مانع از توسعه بیشتر این انرژی باشد. بهینه‌سازی فرایندهای تولید و استفاده از مواد سبک و مقاوم، می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و افزایش مقرون‌به‌صرفگی این پروژه‌ها کمک کند [2].

در زمینه انتخاب مواد، استفاده از ترکیبات نوین و پایدار می‌تواند به بهبود عملکرد توربین‌ها و افزایش عمر آن‌ها منجر شود. تحقیقات جدید در زمینه نانو مواد و کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد که این مواد می‌توانند استحکام و کارایی توربین‌ها را به طور قابل توجهی افزایش دهند. طراحی هندسی توربین‌های بادی نیز باید به دقت مورد توجه قرار گیرد. با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و مدل‌سازی سه‌بعدی، مهندسان می‌توانند به طراحی بهینه‌تری دست یابند که علاوه بر افزایش بازدهی، به کاهش سر و صدا و تأثیرات بصری نیز کمک کند [3].

در نهایت، بهینه‌سازی عملکرد توربین‌ها از طریق تکنیک‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌تواند به ارتقای بهره‌وری سیستم‌های انرژی بادی کمک کند. با تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده از عملکرد توربین‌ها در شرایط مختلف جوی، می‌توان الگوریتم‌هایی را ایجاد کرد که به بهبود عملکرد و افزایش طول عمر این سازه‌ها منجر شود. در مجموع، توسعه و بهینه‌سازی توربین‌های بادی نیازمند یک رویکرد چندجانبه است که در آن جنبه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و فناوری به دقت مورد بررسی قرار گیرد. این تلاش‌ها می‌تواند به تأمین انرژی پاک و پایدار برای نسل‌های آینده کمک شایانی نماید و نقش مؤثری در مبارزه با تغییرات اقلیمی ایفا کند [4].

اهمیت انرژی بادی

انرژی باد به دلیل عدم آلودگی و قابلیت تجدیدپذیری به عنوان یک منبع انرژی پایدار شناخته می‌شود. توربین‌های بادی می‌توانند به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک کنند و به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شوند. با افزایش ظرفیت تولید انرژی بادی در سطح جهانی، اهمیت بهینه‌سازی طراحی این توربین‌ها بیشتر از همیشه احساس می‌شود. بهینه‌سازی طراحی توربین‌های بادی نه تنها می‌تواند کارایی تولید انرژی را افزایش دهد، بلکه به تقویت ایمنی و پایداری این سیستم‌ها نیز کمک خواهد کرد. مهندسان و محققان در تلاشند تا با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، بهبودهایی در ابعاد و شکل

پرده‌ها ایجاد کنند، به طوری که حداکثر انرژی ممکن از وزش باد به دست آید. این تغییرات می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش عمر مفید تجهیزات شود. در کنار این، استفاده از مواد سبک و مقاوم در ساختار توربین‌ها باعث خواهد شد تا این تجهیزات در برابر شرایط جوی نامساعد و تنش‌های مکانیکی مقاوم‌تر باشند. به‌کارگیری هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی الگوهای باد و بهینه‌سازی زمان فعالیت توربین‌ها، می‌تواند به بهبود عملکرد سیستم‌های انرژی بادی کمک شایانی کند [5].

علاوه بر این، سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه زیرساخت‌های مرتبط با انرژی باد، از جمله شبکه‌های توزیع و انبارش انرژی، می‌تواند به تحقق یک اکوسیستم انرژی پایدار و کارآمد بیانجامد. با توجه به روند رو به رشد تقاضای انرژی و تغییرات اقلیمی، توجه به این منابع تجدیدپذیر نه تنها در راستای حفاظت از محیط زیست، بلکه در جهت حفظ امنیت انرژی جهانی نیز ضروری است. در نهایت، جامعه باید به اهمیت فرهنگ‌سازی در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر پی ببرد. آموزش و آگاهی‌بخشی به عموم مردم درباره مزایای انرژی باد و روش‌های بهره‌برداری صحیح از آن، می‌تواند به تغییر نگرش‌ها و رفتارها در جهت استفاده بیشتر از این منبع پاک و بی‌نظیر کمک کند. با اتحاد تلاش‌ها در این زمینه، می‌توان به سمت آینده‌ای پایدار و سرشار از انرژی‌های پاک گام برداشت [6].

چالش‌های طراحی توربین‌های بادی

۱. هزینه‌های بالا

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در طراحی توربین‌های بادی، هزینه‌های تولید و نصب آن‌ها است. هزینه‌های اولیه شامل ساخت، نصب و نگهداری توربین‌ها می‌تواند به طور قابل توجهی بر روی سودآوری پروژه‌های انرژی بادی تأثیر بگذارد. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌هایی که مهندسان و طراحان با آن مواجه هستند، هزینه‌های بالای تولید و نصب توربین‌های بادی است. این هزینه‌ها نه تنها شامل ساخت و راه‌اندازی دستگاه‌ها می‌شود، بلکه نگهداری و تعمیرات دوره‌ای نیز به بار مالی پروژه می‌افزاید. به همین دلیل، سرمایه‌گذاران ممکن است در ارزیابی سودآوری پروژه‌های انرژی بادی با تردید روبه‌رو شوند. افزایش قیمت مواد اولیه و نیروی کار نیز بر این چالش می‌افزاید و می‌تواند به تعویق افتادن بسیاری از طرح‌ها منجر شود [7].

علاوه بر هزینه‌های مستقیم، عواملی مانند انتخاب محل مناسب برای نصب توربین‌ها و هماهنگی با زیرساخت‌های موجود نیز به پیچیدگی‌های مالی پروژه‌ها افزوده می‌شود. برای مثال، نیاز به انتقال برق تولیدشده به شبکه سراسری و نصب تجهیزات جانبی مانند خطوط انتقال، هزینه‌های پنهانی را به همراه دارد که ممکن است در ابتدا مورد توجه قرار نگیرند. به همین دلیل، طراحان باید به دقت در مراحل اولیه برنامه‌ریزی، بهینه‌سازی هزینه‌ها را در اولویت قرار دهند تا بتوانند به توجیه اقتصادی موثری برسند و پروژه‌های خود را به موفقیت برسانند [8].

۲. تأثیرات محیطی

هرچند که توربین‌های بادی به کاهش آلودگی کمک می‌کنند، اما نصب آن‌ها نیز می‌تواند تأثیرات منفی بر روی محیط زیست داشته باشد. از جمله این تأثیرات می‌توان به تخریب زیستگاه‌ها و تأثیر بر حیات وحش اشاره کرد. توربین‌های بادی به عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر، نقش مهمی در کاهش آلودگی و مبارزه با تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند. با این حال، نصب این سازه‌ها می‌تواند عواقب ناگواری برای محیط زیست به همراه داشته باشد. یکی از مهم‌ترین این عواقب، تخریب زیستگاه‌های طبیعی است. برای ایجاد فضای مناسب برای نصب توربین‌ها، ممکن است به قطع درختان، تخریب زمین‌های کشاورزی و

تغییرات در اکوسیستم‌های محلی منجر شود. این تغییرات نه تنها به تنوع زیستی آسیب می‌زند، بلکه می‌تواند باعث از بین رفتن منابع غذایی و محل زندگی بسیاری از گونه‌های جانوری گردد[9].

علاوه بر این، تأثیرات منفی بر حیات وحش نیز قابل توجه است. توربین‌های بادی می‌توانند به عنوان موانعی برای پرندگان و خفاش‌ها عمل کرده و باعث تصادف آن‌ها شوند. همچنین، تغییرات در الگوهای مهاجرت و جفت‌گیری حیوانات به دلیل وجود این سازه‌ها می‌تواند به کاهش جمعیت برخی گونه‌ها منجر شود. در نهایت، برای دستیابی به توسعه پایدار، ضروری است که در طراحی و اجرای پروژه‌های انرژی بادی، تأثیرات اکولوژیکی به دقت بررسی شده و تدابیری برای کاهش اثرات منفی آن‌ها اندیشیده شود[10].

۳. محدودیت‌های فناوری

توسعه فناوری‌های جدید می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی توربین‌های بادی کمک کند، اما هنوز هم محدودیت‌هایی در این زمینه وجود دارد. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به مشکلات مربوط به کارایی و طول عمر توربین‌ها اشاره کرد. توسعه فناوری‌های جدید در طراحی توربین‌های بادی می‌تواند به طرز چشمگیری به بهینه‌سازی عملکرد این سازه‌ها کمک کند. با بهره‌گیری از مواد پیشرفته و روش‌های نوین مهندسی، امکان افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های تولید فراهم می‌شود. به عنوان مثال، استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی در طراحی و مدیریت عملکرد توربین‌ها می‌تواند به شبیه‌سازی شرایط محیطی و بهبود راندمان آن‌ها منجر شود. همچنین، فناوری‌های نوین می‌توانند به کاهش سر و صدا و ارتقاء سازگاری زیست‌محیطی این سیستم‌ها کمک کنند[11].

با این حال، هنوز موانع و چالش‌هایی وجود دارد که باید برطرف شوند. یکی از این چالش‌ها، مسائل مرتبط با کارایی و طول عمر توربین‌ها است که می‌تواند بر هزینه‌های تعمیر و نگهداری تأثیر بگذارد. علاوه بر این، شرایط جوی و مکان نصب نیز می‌تواند بر عملکرد این تجهیزات تأثیرگذار باشد. در نتیجه، تحقیق و توسعه در این حوزه نیازمند توجه به عوامل مختلف و به‌کارگیری راهکارهای جامع برای غلبه بر این محدودیت‌ها است[12].

انتخاب مواد مناسب

انتخاب مواد مناسب برای ساخت توربین‌های بادی یکی از عوامل کلیدی در بهینه‌سازی طراحی آن‌ها می‌باشد. مواد سبک و مقاوم می‌توانند به افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های تولید کمک کنند. به عنوان مثال، استفاده از کامپوزیت‌های پیشرفته به کاهش وزن توربین و در نتیجه افزایش توان تولیدی آن کمک می‌کند. علاوه بر این، انتخاب مواد مناسب به ایجاد پایداری و دوام در برابر شرایط جوی نیز کمک می‌کند. برای نمونه، استفاده از آلیاژهای خاص در اجزای مکانیکی می‌تواند به افزایش مقاومت در برابر زنگ‌زدگی و خستگی ناشی از فشارهای محیطی کمک کند. همین‌طور، فناوری‌های نوین در زمینه پوشش‌دهی می‌توانند از سطح توربین‌ها در برابر آسیب‌های ناشی از باد، باران و گرد و غبار محافظت کنند[13].

به‌علاوه، تحقیقات اخیر نشان داده است که استفاده از نانو مواد در ساخت تیغه‌های توربین می‌تواند به بهبود ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی آن‌ها منجر شود. این مواد به دلیل ساختار میکروسکوپی خود، قادرند به طور موثری انرژی را جذب و توزیع کنند و در نتیجه کارایی کلی دستگاه را افزایش دهند. در کنار این موارد، توجه به جنبه‌های زیست‌محیطی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. انتخاب مواد تجدیدپذیر و قابل بازیافت می‌تواند به کاهش اثرات منفی بر محیط زیست کمک کند و در عین

حال به ارتقاء تصویر برندهای تولیدکننده کمک نماید. به همین دلیل، بسیاری از شرکت‌ها در حال سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه مواد سازگار با محیط زیست هستند [14].

در نهایت، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و استفاده از فناوری‌های نوین مانند چاپ سه‌بعدی نیز می‌تواند نقش بسزایی در کاهش هزینه‌ها و زمان ساخت توربین‌های بادی ایفا کند. با این رویکرد، امکان طراحی و تولید قطعات پیچیده‌تر و با کیفیت بالاتر فراهم می‌شود که می‌تواند بهبود عملکرد کلی سیستم‌های بادی را به ارمغان آورد. بنابراین، توجه به انتخاب مواد مناسب نه تنها به افزایش کارایی و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند، بلکه به توسعه پایدار و حفظ محیط زیست نیز منجر خواهد شد [15].

طراحی هندسی توربین

۱. شکل و ابعاد پره‌ها

شکل و ابعاد پره‌های توربین بادی تأثیر زیادی بر روی کارایی آن‌ها دارد. طراحی بهینه پره‌ها می‌تواند به افزایش تولید انرژی و کاهش صدا کمک کند. آزمایش‌های متعدد نشان می‌دهند که تغییرات کوچک در شکل پره‌ها می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر روی عملکرد کلی توربین داشته باشد. شکل و ابعاد پره‌های توربین بادی نقش حیاتی در کارایی و عملکرد آن‌ها ایفا می‌کند. طراحی بهینه این پره‌ها می‌تواند نه تنها به افزایش حجم تولید انرژی کمک کند بلکه موجب کاهش سر و صدا نیز خواهد شد. تحقیقات و آزمایش‌های متعدد نشان می‌دهند که حتی تغییرات اندک در هندسه پره‌ها می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر روی بهره‌وری کل توربین داشته باشد. این تغییرات می‌توانند شامل تغییر در طول، عرض و انحنای پره‌ها باشند که هر یک به نوبه خود می‌تواند جریان هوا را بهبود بخشد [16].

علاوه بر این، فرایند بهینه‌سازی پره‌ها به مهندسان این امکان را می‌دهد تا با استفاده از معادلات دینامیک سیالات و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، به درک بهتری از رفتار توربین در شرایط مختلف بادی برسند. این دانش به طراحان کمک می‌کند تا فرمی ابداعی و کارآمد ایجاد کنند که نه تنها راندمان انرژی را افزایش دهد، بلکه استحکام و پایداری ساختار را نیز تضمین کند. در نهایت، این تلاش‌ها می‌تواند به توسعه فناوری‌های نوین در عرصه انرژی‌های تجدیدپذیر منجر شود و به تحقق اهداف زیست‌محیطی کمک کند [17].

۲. مکان قرارگیری توربین

مکان قرارگیری توربین‌ها نیز بر روی کارایی آن‌ها تأثیرگذار است. انتخاب مکان مناسب که دارای جریان‌های باد پایدار باشد، می‌تواند به افزایش تولید انرژی کمک نماید. همچنین، توجه به فاصله میان توربین‌ها برای جلوگیری از تداخل جریان باد نیز حائز اهمیت است. مکان‌یابی توربین‌های بادی تأثیر بسزایی بر کارایی و بهره‌وری آن‌ها دارد. انتخاب محلی که دارای جریان‌های باد پایدار و قوی باشد، می‌تواند به طرز قابل توجهی تولید انرژی را افزایش دهد. در این راستا، تحلیل شرایط جوی و بررسی الگوهای باد در نواحی مختلف، به تعیین مکان بهینه کمک می‌کند. همچنین، قرارگیری توربین‌ها در مناطقی با کمترین موانع طبیعی، مانند درختان یا ساختمان‌ها، می‌تواند به حداکثر شدن بهره‌وری آن‌ها منجر شود [18].

علاوه بر انتخاب مکان، فاصله مناسب میان توربین‌ها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چنانچه فاصله‌ها به درستی رعایت نشود، تداخل جریان باد می‌تواند به کاهش کارایی سیستم منجر شود. به همین دلیل، طراحی مناسب و توجه به الگوهای باد در چیدمان توربین‌ها نه تنها به بهبود عملکرد آن‌ها کمک می‌کند، بلکه سبب بهینه‌سازی تولید انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی نیز می‌گردد. با در نظر گرفتن این عوامل، می‌توان از حداکثر پتانسیل منابع بادی بهره‌برداری کرد [19].

بهینه‌سازی عملکرد

۱. سیستم‌های کنترل هوشمند

استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد توربین‌های بادی کمک کند. این سیستم‌ها قادرند با تجزیه و تحلیل داده‌های محیطی، تنظیمات لازم را برای حداکثر تولید انرژی انجام دهند. به عنوان مثال، این سیستم‌ها با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته و یادگیری ماشین، می‌توانند الگوهای تغییرات وزش باد را شناسایی کنند و به‌طور خودکار زاویه پره‌ها را تنظیم کنند. این تنظیمات دقیق نه تنها باعث افزایش بهره‌وری انرژی می‌شود، بلکه عمر مفید تجهیزات را نیز بهبود می‌بخشد [20].

علاوه بر این، با ادغام سنسورهای هوشمند، این فناوری‌ها می‌توانند وضعیت سلامت توربین‌ها را به‌طور مداوم زیر نظر داشته باشند. در صورت شناسایی هرگونه ناهنجاری، سیستم به‌سرعت به اپراتورها هشدار می‌دهد و این امکان را فراهم می‌سازد که اقدامات پیشگیرانه به‌موقع انجام شود. این رویکرد پیشگیرانه به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های تولید انرژی کمک می‌کند. در نهایت، استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند می‌تواند به کاهش ردپای کربن و حفاظت از محیط‌زیست منجر شود. با بهینه‌سازی عملکرد توربین‌های بادی، ما می‌توانیم انرژی پاک‌تری تولید کنیم و به‌سوی یک آینده پایدارتر گام برداریم. در این راستا، همکاری نزدیک بین محققان، صنعت و دولت‌ها ضروری است تا از پتانسیل‌های این فناوری به‌خوبی بهره‌برداری شود [21,22].

۲. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه

نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نیز نقش مهمی در بهینه‌سازی عملکرد توربین‌های بادی ایفا می‌کند. با ایجاد برنامه‌های منظم برای بازرسی و تعمیر، می‌توان از بروز مشکلات جدی جلوگیری کرد و طول عمر توربین‌ها را افزایش داد. این برنامه‌ها معمولاً شامل بررسی‌های دوره‌ای اجزای کلیدی مانند پره‌ها، ژنراتورها و سیستم‌های کنترلی می‌شود. در این راستا، استفاده از تکنولوژی‌های نوین نیز می‌تواند به بهبود کارایی این بازرسی‌ها کمک کند. به عنوان مثال، به کارگیری دوربین‌های حرارتی و سنسورهای لرزشی امکان شناسایی نشانه‌های خرابی را قبل از وقوع حادثه فراهم می‌آورد [23].

علاوه بر این، آموزش و توانمندسازی کارکنان نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. افرادی که با این تجهیزات کار می‌کنند، باید با تکنیک‌های جدید و روش‌های بهینه تعمیر و نگهداری آشنا شوند تا بتوانند به بهترین نحو ممکن از تجهیزات بهره‌برداری کنند. همچنین، تجزیه و تحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده از توربین‌ها می‌تواند به شناسایی الگوهای خرابی و بهبود عملکرد سیستم کمک کند. با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته، می‌توان روندهای عملکرد را بررسی کرده و نقاط قوت و ضعف هر توربین را شناسایی نمود. این اطلاعات نه تنها به بهینه‌سازی فرآیند نگهداری کمک می‌کند، بلکه می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک نیز مؤثر باشد [24].

در نهایت، با ایجاد یک فرهنگ سازمانی مبتنی بر پیشگیری و بهبود مستمر، می‌توان به حداکثر کارایی و ایمنی دست یافت. سرمایه‌گذاری در نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نه تنها هزینه‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه به ایجاد یک محیط کار ایمن‌تر و پایدارتر نیز منجر می‌شود. در نتیجه، این رویکرد نه تنها به نفع شرکت‌هاست، بلکه به حفظ انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش اثرات زیست‌محیطی نیز کمک می‌کند [25].

تحقیقات و نوآوری‌ها

تحقیقات و نوآوری‌های علمی در زمینه طراحی توربین‌های بادی می‌تواند به بهینه‌سازی این سیستم‌ها کمک شایانی کند. استفاده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری و مدل‌سازی می‌تواند به پیش‌بینی عملکرد توربین‌ها در شرایط مختلف کمک کند و در نتیجه به طراحی بهینه‌تری منجر شود. علاوه بر این، بهره‌گیری از تکنیک‌های نوین در مواد مورد استفاده نیز می‌تواند تأثیر چشم‌گیری بر کارایی توربین‌های بادی داشته باشد. انتخاب موادی با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بهتر، نه تنها عمر مفید این دستگاه‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه می‌تواند در کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری نیز مؤثر باشد [26].

با گسترش دانش در زمینه دینامیک سیالات و رفتار باد، مهندسان قادر خواهند بود تا الگوهای جریان هوا را به دقت تحلیل کنند. این امر، امکان طراحی پره‌های بهینه و متناسب با شرایط جغرافیایی خاص هر منطقه را فراهم می‌آورد. به علاوه، تحقیقات در حوزه هوش مصنوعی می‌تواند به شناسایی و پیش‌بینی الگوهای باد کمک کند و به این ترتیب، عملکرد توربین‌ها را در زمان واقعی بهبود بخشد. در این راستا، توجه به ذخیره‌سازی انرژی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. توسعه فناوری‌های جدید در این حوزه می‌تواند به مدیریت بهتر انرژی تولید شده کمک کند و چالش‌های ناشی از نوسانات تولید برق را کاهش دهد. به عبارتی دیگر، یکپارچه‌سازی سیستم‌های ذخیره‌سازی با مزارع بادی می‌تواند به افزایش بهره‌وری و پایداری انرژی‌های تجدیدپذیر منجر شود [27].

نهایتاً، همکاری‌های بین‌المللی و تبادل دانش میان محققان و صنعتگران در این زمینه می‌تواند به تسریع فرآیند نوآوری و پیشرفت در این صنعت کمک کند. برگزاری کنفرانس‌ها و کارگاه‌های تخصصی، همچنین ایجاد شبکه‌های تحقیقاتی مشترک، این امکان را فراهم می‌آورد که تجربیات و یافته‌های جدید به سرعت در سطح جهانی به اشتراک گذاشته شود و به بهبود مستمر فناوری‌های مرتبط با توربین‌های بادی منجر گردد. بدین ترتیب، آینده‌ای روشن و پایدار در انتظار انرژی‌های تجدیدپذیر خواهد بود که نه تنها به حفظ محیط زیست کمک می‌کند، بلکه به توسعه اقتصادی و اجتماعی جوامع نیز شتاب می‌بخشد [28].

همکاری‌های بین‌المللی

همکاری‌های بین‌المللی در زمینه تحقیق و توسعه توربین‌های بادی می‌تواند به اشتراک‌گذاری دانش و تجربیات کمک کند. این همکاری‌ها می‌توانند به تسریع در روند نوآوری و بهینه‌سازی طراحی این سیستم‌ها منجر شوند. علاوه بر این، این رویکرد مشترک می‌تواند بستری مناسب برای ایجاد استانداردهای جهانی در حوزه فناوری‌های بادی فراهم آورد. با هم‌افزایی متخصصان و پژوهشگران از کشورهای مختلف، نه تنها به شناسایی چالش‌های موجود پرداخته می‌شود، بلکه راه‌حل‌های نوآورانه‌ای نیز برای بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های تولید توربین‌ها ارائه خواهد شد [29].

در این راستا، پروژه‌های تحقیقاتی مشترک می‌توانند از منابع مالی و تجهیزات پیشرفته بهره‌مند شوند که در دسترس یک کشور به تنهایی نیست. به عنوان مثال، کشورهایی که در زمینه تولید انرژی تجدیدپذیر پیشرو هستند، می‌توانند با انتقال فناوری‌های جدید به کشورهای در حال توسعه، به ارتقاء سطح دانش و توانمندی‌های فنی آن‌ها کمک کنند. این نوع هم‌افزایی می‌تواند به شکل‌گیری زنجیره‌ای از نوآوری‌ها منجر شود که نه تنها به بهبود عملکرد توربین‌ها می‌انجامد، بلکه به کاهش اثرات زیست‌محیطی نیز کمک خواهد کرد [30].

همچنین، تبادل دانش میان دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و صنعت می‌تواند به تقویت آموزش‌های مهارتی و تربیت نیروی انسانی متخصص در این حوزه منجر شود. به این ترتیب، نسل جدیدی از مهندسان و پژوهشگران با توانایی‌های لازم برای طراحی و توسعه سیستم‌های بادی مدرن تربیت می‌شوند که قابلیت رقابت در بازار جهانی را دارند. در نهایت، این همکاری‌های بین‌المللی نه تنها به نفع کشورهای مشارکت‌کننده است، بلکه به پیشرفت پایدار و ارتقای کیفیت زندگی در سطح جهانی نیز کمک می‌کند. با افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، وابستگی به سوخت‌های فسیلی کاهش یافته و در نتیجه، تغییرات اقلیمی با چالش‌های کمتری مواجه خواهد شد. به این ترتیب، آینده‌ای روشن و پایدار در انتظار نسل‌های آینده خواهد بود [31].

آینده توربین‌های بادی

با توجه به روند رو به رشد تقاضا برای انرژی پایدار، آینده توربین‌های بادی روشن به نظر می‌رسد. بهینه‌سازی طراحی این توربین‌ها می‌تواند به افزایش کارایی، کاهش هزینه‌ها و بهبود تأثیرات زیست‌محیطی منجر شود. یکی از جنبه‌های مهم در بهینه‌سازی طراحی توربین‌های بادی، استفاده از مواد سبک و مقاوم است. این مواد نه تنها به کاهش وزن توربین کمک می‌کنند، بلکه تحمل شرایط آب و هوایی نامساعد را نیز افزایش می‌دهند. به همین منظور، محققان در حال بررسی ترکیبات نوین مانند الیاف کربن و آلومینیوم سبک هستند که می‌توانند ساختارهای توربین را به‌طور چشمگیری تقویت کنند [32].

از سوی دیگر، بهبود الگوریتم‌های کنترلی و هوش مصنوعی نیز نقش بسزایی در افزایش بازدهی این سیستم‌ها ایفا می‌کند. با بهره‌گیری از داده‌های واقعی و تحلیل‌های پیشرفته، امکان پیش‌بینی عملکرد توربین‌ها در شرایط مختلف جوی فراهم می‌شود. این امر نه تنها به بهینه‌سازی زمان تعمیر و نگهداری کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به حداکثر رساندن تولید انرژی نیز منجر شود. علاوه بر این، ادغام فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء (IoT) می‌تواند به نظارت دقیق‌تر بر عملکرد توربین‌ها کمک کند. با استفاده از حسگرهای پیشرفته، امکان جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای و تحلیل آن‌ها فراهم می‌شود که به شناسایی مشکلات احتمالی قبل از وقوع خرابی‌های جدی کمک می‌کند [33].

در نهایت، توجه به طراحی بصری و معماری توربین‌ها نیز نباید نادیده گرفته شود. این نکته می‌تواند به پذیرش بهتر و کاهش مقاومت اجتماعی در برابر پروژه‌های بادی کمک کند. طراحی‌های جذاب و خلاقانه می‌توانند به عنوان نمادهایی از پیشرفت و توسعه پایدار در جوامع مختلف شناخته شوند. به طور کلی، با توجه به این تغییرات و نوآوری‌ها، می‌توان انتظار داشت که آینده‌ای روشن برای توربین‌های بادی رقم بخورد؛ آینده‌ای که در آن انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان منبع اصلی تأمین انرژی، در کنار حفظ محیط زیست، جایگاه ویژه‌ای پیدا خواهند کرد [34].

چالش‌های آینده

۱. تغییرات اقلیمی

تغییرات اقلیمی می‌تواند به تغییر الگوهای باد منجر شود و این امر تأثیر زیادی بر روی عملکرد توربین‌های بادی خواهد داشت. بنابراین، نیاز به تحقیقات بیشتر در زمینه پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی و تأثیر آن بر روی انرژی بادی احساس می‌شود. تحقیقات در این حوزه نه تنها به درک بهتر از پدیده‌های جوی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند راهکارهایی برای بهینه‌سازی عملکرد توربین‌ها نیز ارائه دهد. با بررسی دقیق الگوهای جدید باد، دانشمندان می‌توانند پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از منابع انرژی

بادی در آینده داشته باشند. این پیش‌بینی‌ها می‌تواند به توسعه تکنولوژی‌های نوین و سازگار با شرایط متغیر اقلیمی بیانجامد [35].

همچنین، به‌کارگیری مدل‌های ریاضی پیشرفته و فناوری‌های نوظهور مانند یادگیری ماشین می‌تواند ابزارهای مؤثری برای تحلیل داده‌های جوی و شناسایی روندهای نامشخص باشد. با بهره‌گیری از این فناوری‌ها، امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف و ارزیابی تأثیرات آن‌ها بر روی تولید انرژی فراهم می‌شود. علاوه بر این، درک عمیق‌تری از نحوه تعامل توربین‌های بادی با عناصر جوی، می‌تواند به بهبود طراحی و ساخت این تجهیزات منجر شود. به عنوان مثال، طراحی پروفیل‌های جدید برای پره‌های توربین‌ها که بتوانند در برابر تغییرات ناگهانی سرعت و جهت باد مقاومت بیشتری داشته باشند، می‌تواند به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها منجر شود. در نهایت، کار تحقیقاتی در این زمینه نه تنها به تأمین انرژی پایدار کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به کاهش تأثیرات منفی تغییرات اقلیمی بر روی محیط زیست و جوامع انسانی نیز کمک نماید. با توجه به چالش‌های روزافزون ناشی از تغییرات اقلیمی، زمان آن رسیده است که توجه بیشتری به انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌ویژه انرژی بادی معطوف شود [36,37].

۲. رقابت با منابع دیگر انرژی

رقابت با سایر منابع انرژی، از جمله انرژی خورشیدی و فسیلی، نیز یکی از چالش‌های پیش روی صنعت انرژی بادی است. برای باقی ماندن در این رقابت، بهینه‌سازی طراحی و کاهش هزینه‌ها ضروری است. از این رو، مهندسان و محققان در تلاشند تا با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، کارایی توربین‌های بادی را به حداکثر برسانند. به عنوان مثال، استفاده از مواد سبک‌تر و مقاوم‌تر در ساختار توربین‌ها، می‌تواند به افزایش بازده انرژی تولیدی کمک کند. همچنین، طراحی‌های هوشمند و مدرن‌تر، مانند توربین‌های عمودی که کمتر تحت تأثیر بادهای شدید قرار می‌گیرند، به عنوان گزینه‌های جذابی مطرح شده‌اند [38]. در کنار این مسائل، توجه به توسعه زیرساخت‌های شبکه توزیع انرژی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. ایجاد شبکه‌های هوشمند که قابلیت مدیریت بهتر منابع انرژی مختلف را داشته باشند، می‌تواند به یکپارچگی سیستم‌های بادی در شبکه‌های ملی انرژی کمک کند. با پیاده‌سازی این فناوری‌ها، امکان بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هدررفت آن فراهم می‌شود. همچنین، در این راستا، جذب سرمایه‌گذاری‌های خارجی و همکاری با شرکت‌های بین‌المللی می‌تواند به تسریع فرآیند نوآوری و کاهش هزینه‌های تولید منجر شود. رویکردهای جدید در زمینه تأمین مالی پروژه‌ها، مانند استفاده از مدل‌های تأمین مالی جمعی، می‌تواند منجر به تأمین منابع مالی لازم برای گسترش پروژه‌های انرژی بادی باشد [39].

توجه به مسائل زیست‌محیطی و اهمیت پایداری نیز نباید نادیده گرفته شود. با افزایش آگاهی عمومی نسبت به تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن بر زندگی انسان، تقاضا برای منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر هر روز در حال افزایش است. این تغییر در نگرش می‌تواند به نفع صنعت انرژی بادی باشد و موجب افزایش حمایت‌های دولتی و خصوصی از پروژه‌های مرتبط گردد. در نهایت، آینده صنعت انرژی بادی به نوآوری، همکاری و توجه به جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی وابسته است. اگر این صنعت بتواند به چالش‌ها پاسخ دهد و به سمت توسعه پایدار حرکت کند، قطعاً نقش مهمی در تأمین انرژی آینده خواهد داشت و به عنوان یکی از منابع کلیدی در سبد انرژی جهانی شناخته خواهد شد [40].

نتیجه گیری

بهینه سازی طراحی توربین های بادی یک فرآیند پیچیده و چندوجهی است که نیازمند توجه به چالش ها و فرصت های موجود در این زمینه می باشد. با انتخاب مواد مناسب، طراحی هندسی بهینه، استفاده از فناوری های پیشرفته و همکاری های بین المللی، می توان به بهبود عملکرد و کاهش هزینه های تولید توربین های بادی کمک کرد. در نهایت، این اقدامات می توانند به تحقق اهداف توسعه پایدار و کاهش تغییرات اقلیمی کمک نمایند. بهینه سازی طراحی توربین های بادی نه تنها به افزایش تولید انرژی کمک می کند، بلکه به حفاظت از محیط زیست و ترویج استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر نیز منجر خواهد شد.

در این راستا، یکی از جنبه های کلیدی که باید مورد توجه قرار گیرد، تحلیل دینامیک سیالات است. با استفاده از شبیه سازی های پیشرفته و مدل های عددی، مهندسان می توانند جریان هوا را دور تا دور پره های توربین بررسی کرده و نقاط قوت و ضعف طراحی را شناسایی کنند. این اطلاعات امکان اصلاح هندسه پره ها و بهبود عملکرد کلی سیستم را فراهم می آورد. علاوه بر این، انتخاب مواد با خصوصیات مکانیکی و زیست محیطی مناسب، تاثیر بسزایی در طول عمر و کارایی توربین ها دارد. به کارگیری مواد سبک و مقاوم، علاوه بر کاهش وزن کل سازه، می تواند به افزایش ظرفیت تولید انرژی کمک کند. همچنین، پژوهش در زمینه ترکیبات جدید و نانومواد می تواند افق های تازه ای را در این حوزه بگشاید.

در کنار این موارد، استفاده از فناوری های نوین مانند سنسورهای هوشمند و سیستم های خودکار کنترل، امکان پایش لحظه ای و بهینه سازی عملکرد توربین ها را فراهم می آورد. این سیستم ها می توانند با جمع آوری داده های دقیق، به پیش بینی مشکلات احتمالی بپردازند و از بروز خرابی ها جلوگیری کنند. به این ترتیب، بهره وری کلی افزایش یافته و هزینه های نگهداری به حداقل می رسد. همچنین، همکاری های بین المللی در این زمینه می تواند به تبادل دانش و تجربیات منجر شود. ایجاد شبکه های تحقیقاتی و نهادهای مشترک، موجب هم افزایی و شتاب در پیشرفت فناوری ها خواهد شد. با توجه به چالش های جهانی نظیر تغییرات اقلیمی، این همکاری ها از اهمیت ویژه ای برخوردارند و می توانند به تسریع در انتقال به سمت انرژی های تجدیدپذیر کمک کنند.

در نهایت، بهینه سازی طراحی توربین های بادی نه تنها یک ضرورت فنی است، بلکه نیازمند دیدگاهی جامع و تعامل مستمر میان تمامی ذینفعان، از کارشناسان علمی گرفته تا سیاست گذاران و سرمایه گذاران می باشد. تنها با این رویکرد می توان به سوی آینده ای پایدار و سبز حرکت کرد، جایی که انرژی های تجدیدپذیر به عنوان یکی از ارکان اصلی تأمین انرژی جهان شناخته شوند.

منابع:

1. Jacobson, M.Z.; Delucchi, M.A. A path to sustainable energy by 2030. *Sci. Am.* 2009, 301, 58–65.
2. Şahin, A.D. Progress and recent trends in wind energy. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2004, 30, 501–543.
3. Ackermann, T.; Söder, L. An overview of wind energy-status 2002. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2002, 6, 67–127.
4. Irena, I.-E. IRENA-Wind Power-Technology Brief. 2016. Available online: <https://www.irena.org/publications/2016/Mar/Wind-Power> (accessed on 10 December 2023).
5. Muskulus, M.; Schafhirt, S. Design optimization of wind turbine support structures-a review. *J. Ocean Wind Energy* 2014, 1, 12–22.
6. Banos, R.; Manzano-Agugliaro, F.; Montoya, F.; Gil, C.; Alcayde, A.; Gómez, J. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2011, 15, 1753–1766.
7. Lei, M.; Shiyang, L.; Chuanwen, J.; Hongling, L.; Yan, Z. A review on the forecasting of wind speed and generated power. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009, 13, 915–920.
8. Ramirez-Rosado, I.J.; Fernandez-Jimenez, L.A.; Monteiro, C.; Sousa, J.; Bessa, R. Comparison of two new short-term wind-power forecasting systems. *Renew. Energy* 2009, 34, 1848–1854.
9. Costa, A.; Crespo, A.; Navarro, J.; Lizcano, G.; Madsen, H.; Feitosa, E. A review on the young history of the wind power short-term prediction. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2008, 12, 1725–1744.
10. Sfetsos, A. A comparison of various forecasting techniques applied to mean hourly wind speed time series. *Renew. Energy* 2000, 21, 23–35.
11. Zhang, Y.; Wang, J.; Wang, X. Review on probabilistic forecasting of wind power generation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 32, 255–270.
12. Miller, A.; Chang, B.; Issa, R.; Chen, G. Review of computer-aided numerical simulation in wind energy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 25, 122–134.
13. Platt, A. Available online: <https://github.com/OpenFAST/openfast> (accessed on 10 December 2023).
14. Bortolotti, P.; Bottasso, C.L.; Croce, A. Combined preliminary–detailed design of wind turbines. *Wind Energy Sci.* 2016, 1, 71–88.
15. Heinz, J.C.; Sørensen, N.N.; Zahle, F. Fluid–structure interaction computations for geometrically resolved rotor simulations using CFD. *Wind Energy* 2016, 19, 2205–2221.
16. Scott, S.; Macquart, T.; Rodriguez, C.; Greaves, P.; McKeever, P.; Weaver, P.; Pirrera, A. Preliminary validation of ATOM: An aero-servo-elastic design tool for next generation wind turbines. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1222, 012012.
17. Del Carre, A.; Muñoz-Simón, A.; Goizueta, N.; Palacios, R. SHARPy: A dynamic aeroelastic simulation toolbox for very flexible aircraft and wind turbines. *J. Open Source Softw.* 2019, 4, 1885.
18. Marten, D.; Wendler, J.; Pechlivanoglou, G.; Nayeri, C.N.; Paschereit, C.O. QBLADE: An open source tool for design and simulation of horizontal and vertical axis wind turbines. *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.* 2013, 3, 264–269.

19. Leimeister, M.; Kolios, A.; Collu, M. Development of a framework for wind turbine design and optimization. *Modelling* 2021, 2, 105–128.
20. Madsen, M.H.A.; Zahle, F.; Sørensen, N.N.; Martins, J.R. Multipoint high-fidelity CFD-based aerodynamic shape optimization of a 10 MW wind turbine. *Wind Energy Sci.* 2019, 4, 163–192.
21. Horcas, S.G.; Ramos-García, N.; Li, A.; Pirrung, G.; Barlas, T. Comparison of aerodynamic models for horizontal axis wind turbine blades accounting for curved tip shapes. *Wind Energy* 2023, 26, 5–22.
22. Ramos-García, N.; Sessarego, M.; Horcas, S.G. Aero-hydro-servo-elastic coupling of a multi-body finite-element solver and a multi-fidelity vortex method. *Wind Energy* 2021, 24, 481–501.
23. Lee, K.; Huque, Z.; Kommalapati, R.; Han, S.-E. Fluid-structure interaction analysis of NREL phase VI wind turbine: Aerodynamic force evaluation and structural analysis using FSI analysis. *Renew. Energy* 2017, 113, 512–531.
24. Wainwright, T.R.; Poole, D.J.; Allen, C.B.; Appa, J.; Darbyshire, O. High Fidelity Aero-Structural Simulation of Occluded Wind Turbine Blades. In *Proceedings of the AIAA Scitech 2021 Forum*, Online, 11–15 January 2021; p. 0950.
25. Cheng, P.; Huang, Y.; Wan, D. A numerical model for fully coupled aero-hydrodynamic analysis of floating offshore wind turbine. *Ocean Eng.* 2019, 173, 183–196.
26. Gray, J.S.; Hearn, T.A.; Moore, K.T.; Hwang, J.; Martins, J.R.; Ning, A. Automatic evaluation of multidisciplinary derivatives using a graph-based problem formulation in OpenMDAO. In *Proceedings of the 15th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, Atlanta, GA, USA, 16–20 June 2014; p. 2042.
27. Ning, A.; Petch, D. Integrated design of downwind land-based wind turbines using analytic gradients. *Wind Energy* 2016, 19, 2137–2152.
28. Ingersoll, B.; Ning, A. Efficient incorporation of fatigue damage constraints in wind turbine blade optimization. *Wind Energy* 2020, 23, 1063–1076.
29. Bortolotti, P.; Dixon, K.; Gaertner, E.; Rotondo, M.; Barter, G. An efficient approach to explore the solution space of a wind turbine rotor design process. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020, 1618, 042016.
30. Bottasso, C.L.; Campagnolo, F.; Croce, A. Multi-disciplinary constrained optimization of wind turbines. *Multibody Syst. Dyn.* 2012, 27, 21–53.
31. Hand, M.M.; Simms, D.A.; Fingersh, L.J.; Jager, D.W.; Cotrell, J.R.; Schreck, S.; Larwood, S.M. *Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns*; National Renewable Energy Lab.: Golden, CO, USA, 2001.
32. Batay, S.; Baidullayeva, A.; Zhao, Y.; Wei, D. Aero-Structural Design Optimization of Wind Turbine Blades. *Preprints* 2023, 2023101072.
33. He, P.; Mader, C.A.; Martins, J.R.; Maki, K.J. Dafoam: An open-source adjoint framework for multidisciplinary design optimization with openfoam. *AIAA J.* 2020, 58, 1304–1319.
34. Boopathy, K.; Kennedy, G.J. Parallel finite element framework for rotorcraft multibody dynamics and discrete adjoint sensitivities. *AIAA J.* 2019, 57, 3159–3172.

35. Gray, J.S.; Hwang, J.T.; Martins, J.R.; Moore, K.T.; Naylor, B.A. OpenMDAO: An open-source framework for multidisciplinary design, analysis, and optimization. *Struct. Multidiscip. Optim.* 2019, 59, 1075–1104.
36. Bons, N.P.; Martins, J.R.; Odagui, F.I.; Cuco, A.P.C. Aerostructural wing optimization of a regional jet considering mission fuel burn. *ASME Open J. Eng.* 2022, 1, 011046.
37. Sgueglia, A.; Schmollgruber, P.; Bartoli, N.; Benard, E.; Morlier, J.; Jasa, J.; Martins, J.R.; Hwang, J.T.; Gray, J.S. Multidisciplinary design optimization framework with coupled derivative computation for hybrid aircraft. *J. Aircr.* 2020, 57, 715–729.
38. Lafage, R.; Defoort, S.; Lefebvre, T. WhatsOpt: A web application for multidisciplinary design analysis and optimization. In *Proceedings of the AIAA Aviation 2019 Forum*, Dallas, TX, USA, 17–21 June 2019; p. 2990.
39. Martins, J.R. Aerodynamic design optimization: Challenges; perspectives. *Comput. Fluids* 2022, 239, 105391.
40. Spalart, P.; Allmaras, S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. In *Proceedings of the 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, USA, 6–9 January 1992; p. 439.