

# مطالعه انتخاب ماده برای پره‌های توربین باد با توجه به شرایط آب‌وهوایی منجیل

نبرد حبیبی<sup>۱</sup>، دانیال وحدت‌پناه<sup>۲</sup>، کانی زندی‌پور<sup>۲</sup>

۱ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کردستان، سنندج، n.habibi@uok.ac.ir

۲ کارشناس مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کردستان، سنندج

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۱۱

## چکیده

توربین بادی وسیله‌ای است برای تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی. جنس ماده به کار رفته از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در طراحی و ساخت پره‌های توربین بادی است. با توجه به خواص گسترده مواد و گوناگونی رفتار آنها، همچنین شرایط جوی شهر منجیل، در این مقاله سعی شده است تا از بین سه ماده تعیین‌شده مناسب‌ترین آنها شناسایی و نیروی برشی موجود در حین عبور جریان سیال (هوا) از روی پره‌های توربین تخمین زده شود. کمترین میزان تنش به پره‌ای به جنس فیبر کربن وارد می‌شود، همچنین بیشترین تنش که به پره‌ای با همان جنس وارد می‌شود برابر با ۱۶/۷۱ پاسکال است که در مقایسه با تنش وارده بر دیگر پره‌ها، که به جنس دیگری مسلح است، کمترین می‌باشد و میزان تنش فون مایسز فیبر کربن کمتر از دیگر مواد است.

**واژگان کلیدی:** پره توربین، کشیدگی معادل، تنش برشی، شبیه‌سازی عددی، تنش ون مایسز

## ۱. مقدمه

شارژ باتری‌ها یا توان کمکی در قایق‌های بادبانی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که توربین‌های بادی بزرگتر با چرخاندن ژنراتور، تحت عنوان منبع تولید انرژی الکتریکی به‌شمار می‌روند. انواع دیگری از توربین‌های بادی وجود دارد که برای پمپ‌کردن آب استفاده می‌شود و به آن پمپ بادی می‌گویند یا برای آسیاب گندم به کار می‌رود که آسیاب بادی نام دارد و در موارد دیگر به کار می‌رود. نخستین کاربرد انرژی باد به استفاده در توربین‌های چرخان به آسیاب‌های بادی بازمی‌گردد. اولین آسیاب‌های بادی تعداد ۱۲ پره داشتند و پره‌ها از بالای یک دیرک عمودی آویخته می‌شدند. شاید بتوان شکل کلی این آسیاب‌ها را با چرخ‌وفلک شهربازی‌های امروزی مقایسه کرد که

با توجه به کاهش منابع انرژی فسیلی و افزایش روزافزون مصرف انرژی و محدودیت‌های سوخت فسیلی، بالا بودن هزینه‌های آن طی سال‌های اخیر، توجه به جایگزینی برای آن افزایش یافته است. انرژی باد از جمله منابع تجدیدپذیر برای تولید انرژی می‌باشد و یک نوع منبع انرژی پاک از دیدگاه مسائل زیست‌محیطی مورد توجه فراوان محققان و صنعتگران قرار گرفته است. توربین بادی عبارت است از مجموعه‌ای پیچیده از سیستم‌های الکترومکانیکی که انرژی جنبشی باد را به توان الکتریکی تبدیل می‌کند و توان بادی نام دارد [۱-۴]. توربین‌های بادی در دو نوع با محور افقی و با محور عمودی تولید می‌شوند. توربین‌های بادی کوچک برای کاربردهایی مانند

محور اصلی آنها در مرکز دایره‌ای روی زمین نصب شده است و اتاقک‌های چرخ‌وفلک همیشه فاصله ثابتی از سطح زمین دارند. این نوع طراحی برای آسیاب‌های بادی، شاید از بادبان‌های یک کشتی، یا از چرخ‌های دعای بودایی‌های آسیایی، که با نیروی باد می‌چرخید، الهام گرفته شده باشد.

استفاده از انرژی باد پیشینه درازی دارد و به قرن دوم پیش از میلاد در ایران باستان بازمی‌گردد. برای نخستین بار، ایرانیان موفق شدند با استفاده از نیروی باد، دلو (دولاب) یا چرخ چاه را به گردش درآورده و آب را از چاه‌ها به سطح مزارع برسانند [۵-۱۰]. نخستین ماشینی که با استفاده از نیروی باد به حرکت درآمد، چرخ بادی هرون بود؛ اما نخستین آسیاب بادی عملی، در قرن هفتم میلادی در سیستان ساخته شد. پیدایش آسیاب‌های بادی در اروپا مربوط به سده‌های میانه است. اولین مورد ثبت شده در مورد استفاده از آسیاب‌های بادی در کشور انگلستان به دو قرن یازدهم و دوازدهم میلادی برمی‌گردد. نخستین توربین بادی با کاربرد تولید برق، یک ماشین شارژ باتری بود که در ژوئیه ۱۸۸۷ توسط یک مهندس اسکاتلندی به نام جیمز بلایت ساخته شد. چندماه بعد، مخترع آمریکایی، چارلز فرانسیس براش، نخستین بار، توربین باد خودکار را برای تولید برق در کلیولند در اوهایو ساخت. در سال ۱۹۰۸ م، ۷۲ توربین بادی با کاربرد تولید برق (بین ۵ تا ۲۵ کیلووات) در آمریکا فعال بودند. در دهه ۱۹۳۰ م، توربین‌های بادی کوچک برای تولید برق مورد نیاز مزارع در آمریکا، که هنوز سامانه سراسری توزیع برق راه‌اندازی نشده بود، بسیار متداول بودند. در پاییز سال ۱۹۴۱، نخستین توربین بادی در کلاس مگاوات در ورمونت راه‌اندازی شد. نخستین توربین بادی متصل به شبکه برق در بریتانیا در سال ۱۹۵۱ م در جزایر اورکنی ساخته شد. در سال ۲۰۰۶ م، برای اولین بار در اتحادیه اروپا رشد تولید برق از انرژی‌های نو بیش از رشد تولید برق از منابع فسیلی بود.

از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۶ شمسی، ظرفیت تولید برق بادی جهان از ۱۸۰۰۰ مگاوات به ۹۲۰۰۰ مگاوات افزایش یافته است. از سال ۲۰۰۰ تاکنون این صنعت سالانه ۲۵ درصد رشد کرده و هر سه سال دو برابر شده است و این در شرایطی است که رشد اقتصاد جهانی از ۱ تا ۲ درصد در سال بیشتر نیست. در سال ۲۰۰۴ م، تنها ۲۵ مگاوات از ۳۳۰۰۰ مگاوات برق تولید شده در ایران با استفاده از انرژی بادی تولید شده بود. در سال

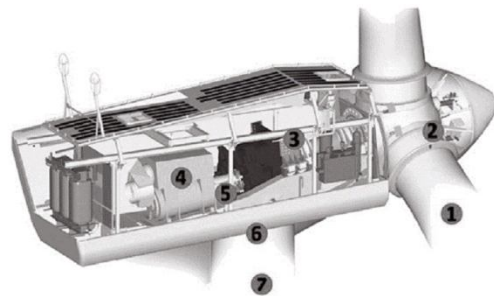
۲۰۰۶ م سهم برق تولیدشده در ایران با استفاده از انرژی بادی ۴۵ مگاوات بود (رتبه ۳۰ در دنیا) که به نسبت سال ۲۰۰۵ م رشد ۴۰ درصدی را نشان می‌داد. در سال ۲۰۰۸ م نیروگاه بادی منجیل (در استان گیلان) و بینالود (در استان خراسان رضوی)، ظرفیت ۸۲ مگاوات برق را داشته‌اند. ظرفیت برق بادی در ایران در سال ۲۰۰۹ م ۱۳۰ مگاوات ساعت بوده است [۱۱-۱۹].

منجیل از شهرهای شهرستان رودبار در استان گیلان است. باد منجیل یکی از عوامل شهرت این شهر می‌باشد که اغلب در بهار و تابستان با شدت بیشتری و در پاییز و زمستان با شدت کمتری می‌وزد. این باد از قدیم معروف به هفت باد منجیل بوده و شدت آن به قدری است که درختان زیتون را اغلب به یک سمت خم می‌کند. اوایل دهه ۷۰ با تصمیم دولت اقدام به خرید و نصب نیروگاه بادی از کشور دانمارک گردید و پس از گذشت چند سال و فراگیری متخصصان داخلی، امروزه پروانه‌های بادی در کشور تولید و در نیروگاه بادی منجیل نصب می‌گردد و این نیروگاه پیوسته گسترش می‌یابد [۱۸].

جنس ماده به کار رفته از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در طراحی و ساخت پره توربین‌های بادی است. با توجه به خواص گسترده مواد و گوناگونی رفتار آنها و همچنین شرایط جوی شهر منجیل، در این مقاله سعی شده است از بین ۳ ماده تعیین شده مناسبترین آنها شناسایی و مورد بررسی بیشتر قرار گیرد. مواد مورد بررسی هر کدام ویژگی‌های خاص و متمایز از هم دارند و در انتخاب آنها سعی شده است که هر کدام نماینده درستی از گروهی گسترده از مواد همجنس و هم‌رده خود باشند. برای ۳ ماده مورد بررسی نیروی برشی موجود در حین عبور جریان سیال (هوا) از روی پره‌های توربین تخمین زده شده است. یکی دیگر از اهداف این کار تعیین نیروی برخورد سیال به پره‌ها، خیز و تنش ون مایسز می‌باشد، سپس با توجه به نتایج حاصل، مناسبترین ماده انتخاب می‌شود. شکل اجزای اصلی توربین باد عبارتند از: ۱. پره، ۲. روتور، ۳. جعبه‌دنده، ۴. ژنراتور، ۵. یاتاقان، ۶. سیستم انحرافی و ۷. برجک (شکل ۱).

مواد کامپوزیتی متشکل از تقویت‌کننده‌ها و رزین هستند تنوع در مواد تقویت‌کننده و رزین می‌تواند در طول فرایند تولید برق از انرژی باد استفاده شود، مانند شیشه‌های کلاس E و شیشه‌های کلاس S، کولار و انواع فیبر کربن. شیشه‌های

تجاری که بر مبنای سیلیکا می‌باشند با ترکیب مخلوطی از مواد در دمای بین ۱۳۰۰ الی ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آیند. شیشه‌ها برای کاهش قیمت، استحکام بالا و سختی متوسط مورد تحلیل قرار گرفته است. کربن در پره‌های اصلی و لبه‌های پیشرو یا اولیه با وجود هزینه بالا به دلیل مقاومت و سختی خاص و بالایی که دارد، استفاده می‌شود. فیبرهای شیشه‌ای دارای یک ساختار آمورفی با خواص ایزوتروپیک هستند، اما فیبرهای کربن یک شبکه کریستالی یا کریستالوگرافی با شکل شش‌گوش به نام گرافیت می‌باشند. پس سختی فیبر کربن ۵ برابر بزرگتر از سختی معادل فیبرهای شیشه‌ای است. بیشترین مواد ترموست مورد استفاده پلی‌استر، وینیل استر و اپوکسی‌ها هستند که نرم و انعطاف‌پذیرند (سختی کم، کمتر از ۴ گیگاپاسکال). سختی کامپوزیت‌های کربنی ۴/۶ برابر کامپوزیت‌های شیشه‌ای و استحکام کششی کامپوزیت‌های کربنی ۱/۳ برابر کامپوزیت‌های شیشه‌ای می‌باشد. چگالی کامپوزیت‌های کربنی نسبت به کامپوزیت‌های شیشه‌ای کمتر است. در پره‌های توربین، الیاف شیشه و کربن براساس ترکیب با هم در ساختار پره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ترکیب بیشتر در حالت مقایسه بین افزایش کارایی و هزینه‌های ایجاد شده در حال تغییر می‌باشند تا به یک ترکیب مناسب از دو نظر عملکرد و اقتصادی برسند [۲۰].



شکل ۱. اجزای اصلی توربین باد [۴]

## ۲. مدلسازی

حداکثر مقدار چگالی انرژی خروجی توربین باد و مدیریت هزینه توسط روتورهای بزرگ، که دارای پره‌های کامپوزیتی بزرگتر و انعطاف‌پذیرتری هستند، به دست می‌آید؛ به گونه‌ای که گاه طول پره‌ها از ۶۰ متر نیز بیشتر می‌شود. روکش‌های پیشرفته کربنی و روکش کامپوزیت شیشه‌ای به شکل گسترده‌ای در طراحی پره‌های جدید مورد استفاده قرار گرفته است. این سیستم

کامپوزیتی و ورقه‌ای مواد باعث ارتقای نرخ سختی/جرم و استحکام/جرم و همچنین ایجاد میرایی که برای کنترل لرزش‌های غیرفعال و بارهای صوتی در انواع طراحی‌های کاربردی مؤثر است، می‌شود. دینامیک ساختاری و خصوصیات و پیش‌بینی پارامترهای میرایی کامپوزیتی در چنین روتورهایی از محدوده مدل‌های خطی شناخته شده خارج می‌شود. از اینرو در نظر گرفتن آثار غیرخطی در تحلیل و محاسبات فرمول‌ها برای توصیف رفتار مجموعه دینامیکی سازه در مقیاس بزرگ مانند پره توربین و پره هلی‌کوپتر ضروری می‌باشد [۲۱].

برای جلوگیری از آسیب وارده به توربین‌های باد، در سرعت ۲۵ متر بر ثانیه توربین از حرکت می‌ایستد. یک توربین می‌تواند طوری طراحی شود که در هر سرعتی از باد، آن را به حداکثر قدرت تبدیل کند، اما این ممکن است به ایجاد هزینه‌های بالا و سنگین شدن توربین منجر شود. هزینه‌های بالای چنین طراحی‌هایی با تولید اضافه در سرعت‌های بالا قابل جبران نخواهد بود؛ در حالی که چنین بادهای پر قدرتی کمتر رخ می‌دهند. به همین دلیل توربین‌ها معمولاً در بادهای با سرعت‌های به مراتب پایین‌تر به حداکثر توان خود می‌رسند که این مقدار حدود ۱۲/۵ متر بر ثانیه می‌باشد [۲۲].

## ۲-۱. شرایط جوی و مشخصات ماده

در شبیه‌سازی به شرایط جوی شهر منجیل مانند سرعت، دما و فشار و خواص مواد مورد بررسی در پره‌ها نیاز است (جدول‌های ۱ و ۲).

## ۲-۲. مدلسازی پره توربین و شبیه‌سازی جریان

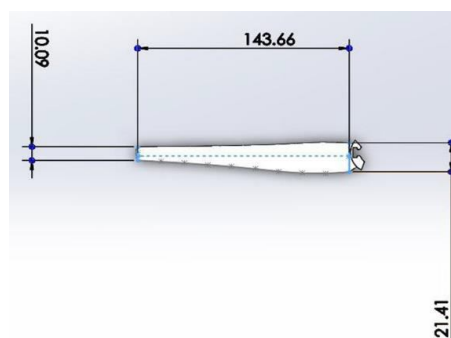
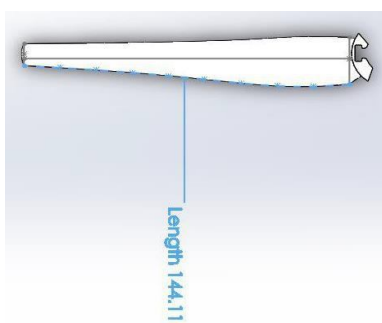
پره توربین در نرم‌افزار سالدورکس برای ابعاد آزمایشگاهی طراحی شده است. ابعاد پره (طول و عرض و قوس پره توربین) مانند شکل‌های ۲ و ۳ می‌باشد که اندازه‌های طول و عرض و قوس توربین و همچنین مساحت قسمت برخورد پره‌ها تعیین می‌شود. سپس نیروی برخورد از طریق رابطه تنش تعیین می‌شود. تحلیل پره‌ها به صورت استاتیکی و همچنین نوع شبکه، جامد است. اندازه آلمان ۱/۹۵ میلی‌متر و تیرانس ۰/۰۹۷۷ میلی‌متر در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. برای هر سه ماده مدلسازی انجام شده است. در شکل ۴ مدل پره توربین برای فیبر کربن نمایش داده شده است.

جدول ۱. مشخصات جوی شهر منجیل [۹]

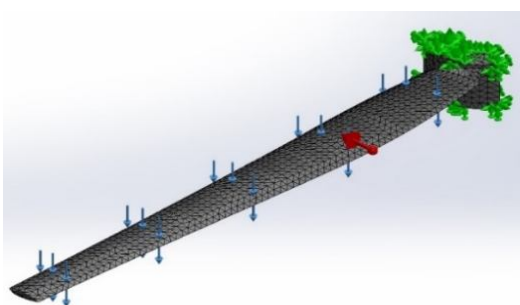
مقدار	فشار (کیلوپاسکال)	دما (کلوین)	سرعت (متر بر ثانیه)
کمینه	۲/۶	۲۶۷/۶۵	۹۵/۳۷
متوسط	۶/۷	۲۹۰/۷۵	۹۷/۶
بیشینه	۱۱/۴	۹۷/۶	۱۰۰/۰۳

جدول ۲. مشخصات مواد مورد استفاده [۲۶]

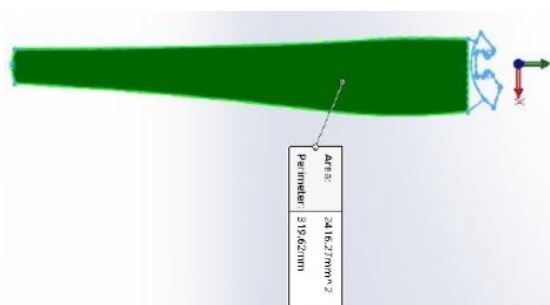
جنس	الیاف کربن	فولاد آلیاژی	آلیاژ آلومینیوم
مدول الاستیک (گیگاپاسکال)	۷۱	۳۱۰	۲/۳۱
نسبت پواسن	۰/۳۲	۰/۲۸	۰/۴
مقاومت کششی (پاسکال)	۲۹۰	۷۲۳/۸۳	۴۶۵۵
مقاومت تسلیم (مگاپاسکال)	۹۳/۰۵۳	۶۲۰/۴۲	۴۶۵۵
ضریب انبساط حرارتی	۰/۰۰۰۰۲۴	۰/۰۰۰۰۱۳	-
چگالی جرمی (کیلوگرم بر متر مکعب)	۲۶۶۰	۷۷۰۰	۱۷۸۰
مدول برشی (گیگاپاسکال)	۲۶/۴	۷۹	۲/۷



شکل ۲. طول و عرض و طول قوس پره توربین برحسب میلی متر



شکل ۴. مدل سازی پره توربین در نرم افزار برای جنس الیاف کربن



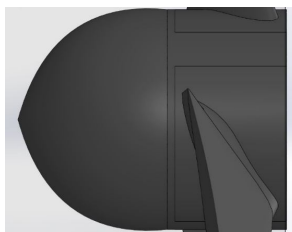
شکل ۳. محاسبه مساحت قسمت برخورد،  $A = 0.002416 \text{ m}^2$

وهوایی منجیل به عنوان شرایط مرجع انتخاب شده و سپس مدل در شرایط اشاره شده قرار داده و می توان مقادیر بیشینه و کمینه را در هر قسمت از پره توربین مشاهده نمود. برای روند

همچنین در شبیه سازی جریان، جریان هایی چون جریان های باد، آب و بسیاری از سیالات دیگر در نظر گرفته می شود. در این قسمت شرایط جوی مربوطه به شرایط آب

شبهه‌سازی، ابتدا تمام شرایط جوی تعیین می‌شود. سپس محدوده وارد کردن جریان مشخص می‌گردد که در شکل ۵ قابل مشاهده است. دلیل انتخاب چنین محدوده‌ای جلوگیری از تخلخل‌های ناخواسته است. این کار سبب کمتر شدن خطا و همچنین عملکرد سریع شبهه‌سازی می‌شود. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که محدوده مرزی به مقدار بسیار کمی عقب‌تر از قسمت انتهایی کل توربین است، این کار باعث جلوگیری از تخلخل جریان هوا در قسمت عقب نگه دارنده پره‌های توربین می‌شود که درصد خطا را کاهش می‌دهد. از طریق وارد کردن تک‌تک شرایط جوی به‌دست آمده، نوع جریان را می‌توان مشخص نمود. سپس نوع ماده یا همان جنس توربین طبق جدول ۲ انتخاب می‌شود [۲۳-۲۶]. برای ملموس شدن مشاهدات، هر جنس در شرایط میانگین قرارداده و سپس شکل کلی مسیر

جریان شبهه‌سازی مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۶ جریان را از روی پره‌های توربین عبور داده و مسیر جریان و تغییرات سرعت در همه شکل‌ها بر روی صفحه جلو (XZ) در شکل نشان داده شده است که مسیر جریان از پره‌ها جدا شده و بعد از رد شدن از آن به پشت پره می‌رود. در این قسمت برای هر ۳ ماده مورد بررسی شکل‌ها به‌صورت مقایسه‌ای در تمام جهت‌ها (پشت، جلو، زیر و از زاویه ۴۵ مایل ۴۵ درجه از عقب) مشاهده می‌شود (شکل‌های ۶ الی ۹). در شکل ۵ تراکم جریان و همچنین مسیر جریان از نمای روبرو نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۶ تراکم جریان و مسیر جریان از نمای عقب نمایش داده شده است. می‌توان در این شکل مقادیر بیشینه و کمینه سرعت را مشاهده کرد. تراکم جریان و مسیر جریان از نمای زیر مطابق شکل‌های ۸ می‌باشد.

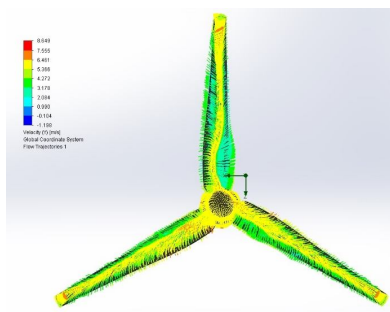


(ب)

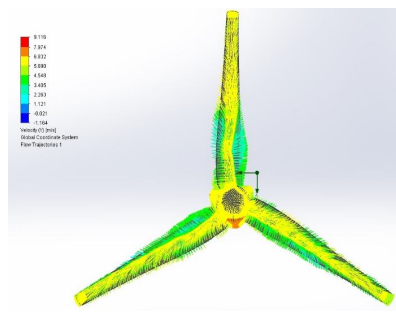


(الف)

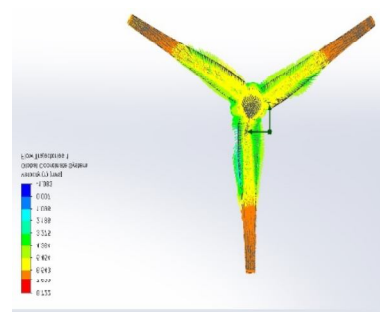
شکل ۵. مدل پره توربین و محدوده مشخص جهت ورود جریان



(ج)

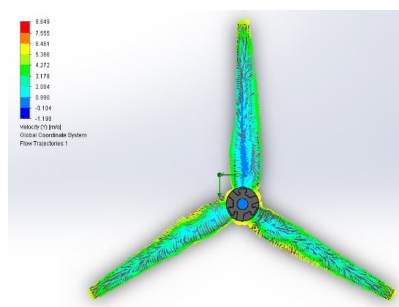


(ب)

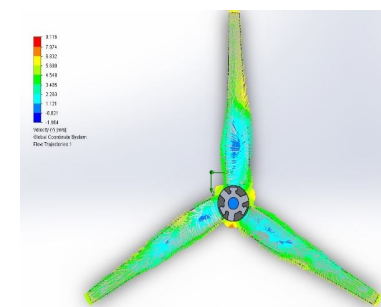


(الف)

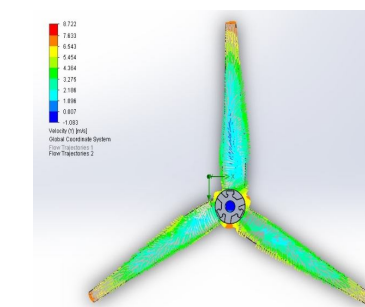
شکل ۶. عبور جریان از پره توربین با سه جنس متفاوت در نمای روبرو، (الف) آلومینیوم، (ب) فولاد آلیاژی، (ج) فیبر کربن



(ج)

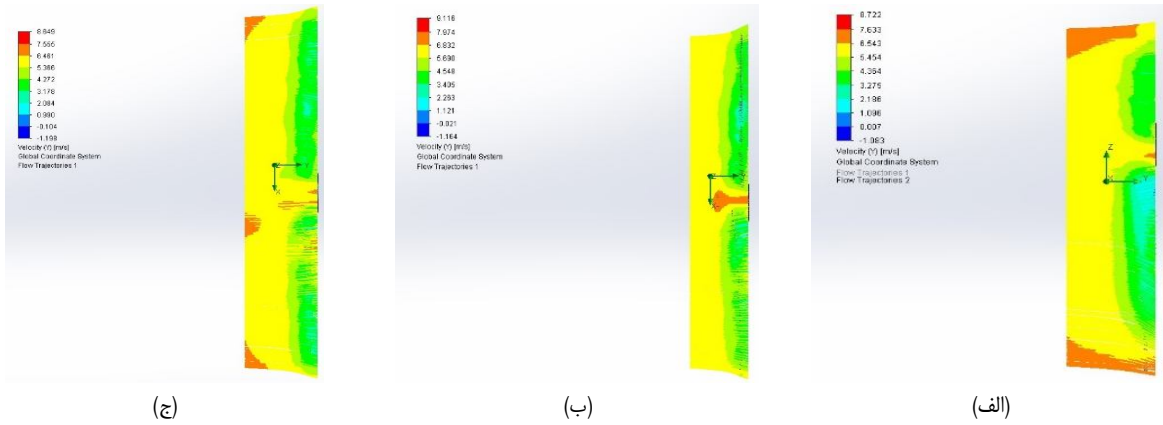


(ب)

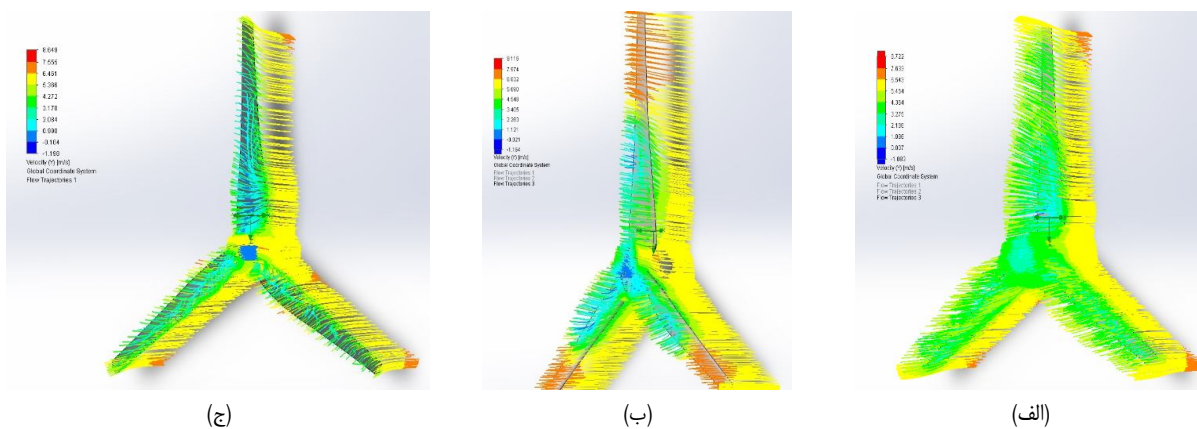


(الف)

شکل ۷. عبور جریان از پره توربین با سه جنس متفاوت از نمای پشتی، (الف) آلومینیوم، (ب) فولاد آلیاژی، (ج) الیاف کربن



شکل ۸. عبور جریان از پره توربین با سه جنس متفاوت از نمای زیر، (الف) آلیاژ آلومینیوم، (ب) فولاد آلیاژی، (ج) ایف کربن



شکل ۹. عبور جریان از پره توربین با سه جنس متفاوت در نمای مایل ۴۵ درجه از عقب، (الف) آلیاژ آلومینیوم، (ب) فولاد آلیاژی، (ج) ایف کربن

جهت تحلیل دقیق‌تر، بین نقاط کمینه و بیشینه ۳۰ نقطه در نظر گرفته شده است. این کار سبب تخمین بهتر نتایج می‌شود. با وارد کردن نقاط حاصل از شرایط جوی، داده‌های تنش برشی برای هر کدام از ماده‌ها به دست آمده است. این شبیه‌سازی بالغ بر ۲۷۰ بار تکرار می‌شود تا در هر نوع ماده ۹۰ حالت بررسی شود. در مرحله بعد پره‌های توربین در معرض نیرو قرار گرفته است. با توجه به بیشینه نیروی برشی مورد نیاز، شرایط جوی در حالت بیشینه آن لحاظ می‌شود. برای این شرایط (فشار ۱۰۰۳۰ کیلو پاسکال، دمای ۳۱۸/۷۵ کلوین و سرعت ۳۲/۲ متر بر ثانیه) برای هر کدام از مواد مورد بررسی اطلاعات داده شده مطابق مآخذ ۲۶ می‌باشد. بیشینه تنش برشی برای سه جنس پره مطابق جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳. بیشینه تنش برشی برای سه جنس مختلف پره

جنس پره	ایف کربن	فولاد آلیاژی	آلیاژ آلومینیوم
بیشینه تنش برشی	۱۶/۷۱	۳۶/۲۷	۳۴/۳۹

سرانجام، تراکم جریان و همچنین مسیر جریان از نمای مایل ۴۵ درجه از عقب در شکل‌های ۹ آمده است که می‌توان مقادیر بیشینه و کمینه سرعت را مشاهده کرد.

### ۳. بررسی نتایج

#### ۳-۱. تنش برشی

مطابق شکل‌های ۷ و ۹ سرعت در پشت پره‌ها منفی است. این موضوع به این خاطر است که وقتی در موقع عبور، جریان از سطح جدا می‌شود در پشت پره اغتشاش ایجاد می‌شود و جریان (هوا) باز می‌گردد. تا زمانی که این پدیده ادامه می‌یابد نیرویی به پره وارد می‌کند. برای بدست آوردن تنش برشی ۳ حالت زیر لحاظ شده است [۲۷-۲۸]:

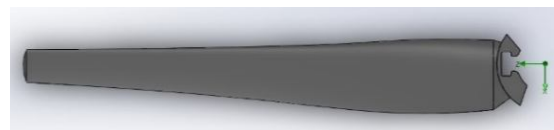
۱. دما و فشار با میانگین ثابت و سرعت متغیر
۲. سرعت و دما با میانگین ثابت و فشار متغیر
۳. فشار و سرعت با میانگین ثابت و دما متغیر

### ۲-۳. شبیه‌سازی نیروی وارده بر پره توربین

طراحی یک پره توربین باد، تعادلی بین اثرودینامیک و شرایط ساختاری لازم دارد. ملاحظات اثرودینامیکی معمولاً بر دو سوم از طراحی بیرونی پره توربین تأثیر دارد؛ در حالی که شرایط ساختاری برای طراحی داخلی پره یک سوم تأثیر را داراست. از لحاظ ساختاری پره معمولاً توخالی است که لایه خارجی آن توسط دو پوسته (یک پوسته در سمت مکش و دیگری در سمت فشار) شکلدهی می‌شود. پرها در ابتدا از تخته‌های سه‌لایه با چارچوب یا تیغه نگه‌دارنده از جنس فولاد ضدزنگ ساخته می‌شد که شباهت بسیاری به طراحی بال‌های هواپیما داشت. امروزه فناوری ساخت پرها بر اساس کائوچو و مواد مرکب قابل سفت شدن در مقابل حرارت برای تولید چارچوب مسلح مناسب نیست. نیروی خارجی که بر پره وارد می‌شود فقط سبب ایجاد نیروی داخلی مانند تنش و کرنش نمی‌شود، بلکه می‌تواند باعث تغییر شکل پره به صورت محسوسی گردد. گاهی در بخش یا ناحیه‌ای خاص، کل پره یا سطح می‌تواند کج یا شکسته شود. پوسته پره برای تحمل بار اصلی ناشی از باد طراحی نشده است بلکه وظیفه اصلی آن ایجاد بهترین شرایط اثرودینامیکی و تبدیل فشار اثرودینامیکی به نیرویی است که به ستون اصلی و بدنی اصلی توربین منتقل شود [۲۹]. نمایی از محدوده مورد بررسی در شبیه‌سازی پره توربین در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.



(الف)

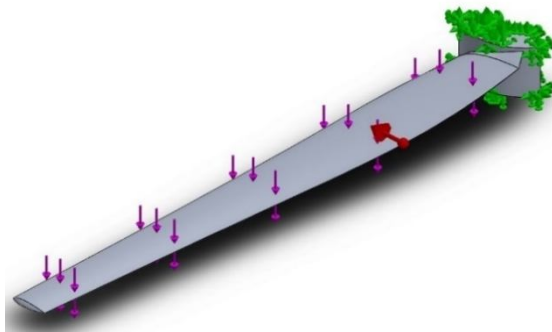


(ب)

شکل ۱۰. نمایی از مدل پره توربین، الف نمای راست، ب نمای بالا

برای به‌دست آوردن تحلیل نیرو بر روی پره‌های توربین ابتدا باید محل تکیه‌گاه پره مشخص شود، این محل دقیقاً محل تلاقی پره با نگه‌دارنده توربین می‌باشد. برای تمام پرها با مواد مختلف قسمت نگه‌دارنده یکسان است (شکل ۱۱). حال با داشتن تنش برشی بیشینه برای هر کدام از مواد می‌توان با داشتن مساحت مقدار نیروی بیشینه را به‌دست آورد. برای سه

جنس مورد بررسی نیروی وارد بر پره توربین در جدول ۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱. شرایط مرزی و تکیه‌گاهی پره توربین مورد بررسی

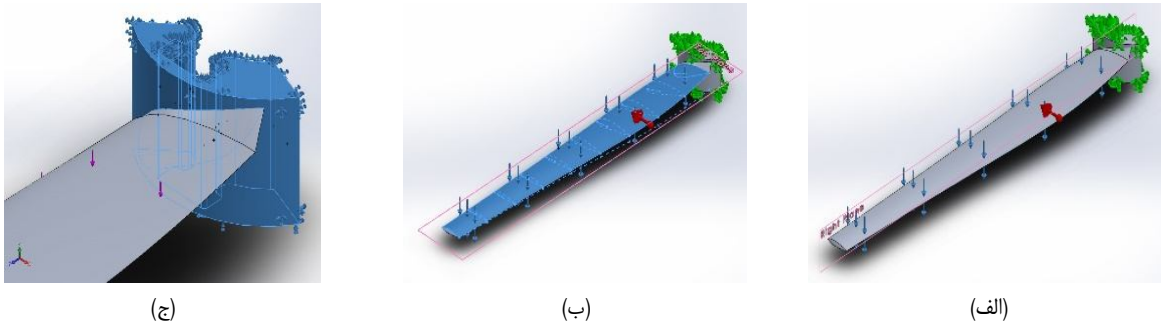
جدول ۴. بیشینه نیروی حاصل از شبیه‌سازی برای سه جنس مختلف پره

جنس پره	الیاف کربن	فولادآلیاژی	آلیاژ آلومینیوم
بیشینه نیرو	۰/۰۴۰۳۷	۰/۰۶۴۱۰	۰/۰۸۳۰۸

با داشتن حداکثر نیروها برای تمامی مواد می‌توان بخش شبیه‌سازی نیرو را شروع کرد. توجه داشته باشید در تمامی شبیه‌سازی‌ها نیروی جاذبه نیز در نظر گرفته شده است. بارگذاری نیرو برای پره مطابق شکل ۱۲ و نیروی برآیند عکس‌العمل حاصل تکیه‌گاهی برای هر سه جنس مانند جدول ۵ می‌باشد. با توجه به جدول ۵ و مقایسه نیروی برآیند برای هر سه جنس مشاهده می‌شود که کمترین مقدار برآیند نیرو به الیاف کربن وارد می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیرو به صورت تنش‌های ون مایسز، جابه‌جایی، کشیدگی معادل طبقه‌بندی می‌شود. نتایج حاصل در جدول ۶ آمده است. تنش ون مایسز ایجادشده روی پره توربین در شکل ۱۳ برای جنس فولاد آلیاژی مشاهده می‌شود. با توجه به جدول ۶ دریافت می‌شود که کمترین میزان تنش ون مایسز به فیبر کربن وارد می‌شود پس درست‌ترین انتخاب، انتخاب همین ماده برای تحمل تنش ون مایسز می‌باشد. مقدار جابه‌جایی ایجادشده روی پره توربین نیز در شکل ۱۴ برای جنس فولاد آلیاژی مشاهده می‌شود. با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که کمترین مقدار جابه‌جایی در فولاد آلیاژی اتفاق می‌افتد. اما بیشترین مقدار جابه‌جایی در فیبر کربن اتفاق می‌افتد و به‌علت اثر خواص الاستیک ماده می‌باشد. در فلزات به‌دلیل مدول الاستیسیته بیشتر مقدار جابه‌جایی کمتر است. مقدار کشیدگی معادل ایجادشده روی پره توربین نیز در

الاستیک ماده است که در خواص ماده اشاره شده است. چون مدول الاستیک در مواد فلزی بسیار بیشتر از مواد دیگر است، پس کمترین کشیدگی در آنها رخ می‌دهد.

شکل ۱۵ برای جنس فولاد آلیاژی مشاهده می‌شود. با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که کمترین مقدار کشیدگی معادل در آلیاژ آلومینیوم صورت می‌پذیرد و بازکشیدگی یکی از مشخصات



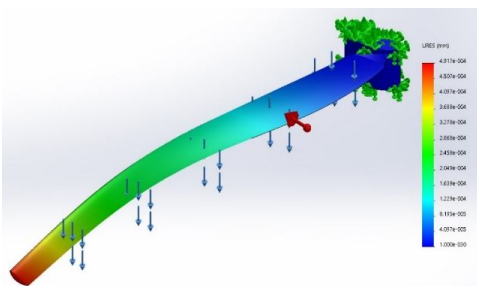
شکل ۱۲. بارگذاری نیرو روی پره توربین مورد بررسی، الف) نمای بالا، ب) نمای راست، ج) تکیه‌گاه

جدول ۵. بیشینه نیروی برآیند عکس‌العملی برای سه جنس مختلف پره

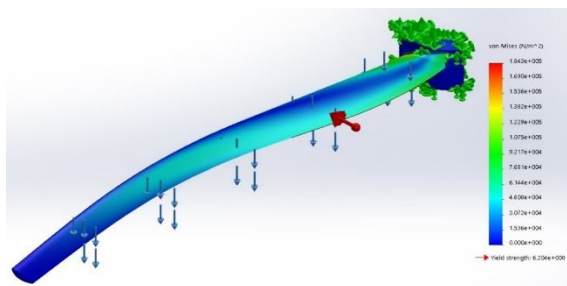
جنس پره	الیاف کربن	فولاد آلیاژی	آلیاژ آلومینیوم
برآیند عکس‌العملی (نیوتن)	۰/۱۳۵۹۶۶	۰/۵۶۵۵۴۹	۰/۲۱۱۰۹۳

جدول ۶. نتایج حاصل از شبیه‌سازی پره توربین با اعمال نیروی تعیین شده در جدول ۴

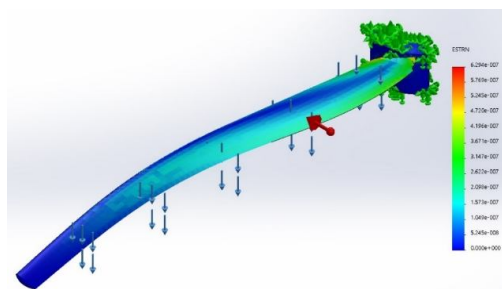
جنس پره	الیاف کربن	فولاد آلیاژی	آلیاژ آلومینیوم
بیشینه مقاومت معادل (ضرب در $10^{-7}$ )	۱۳۳/۱۱۳	۶/۲۹۳۳۲	۸/۴۲۸۲۵
بیشینه جابه‌جایی (میلی‌متر)	۰/۰۴۱۴۰۸	۰/۰۰۴۹۱۶۸۸	۰/۰۰۴۶۰۳۶۲
بیشینه تنش فون مایسز (کیلوپاسکال)	۴۳/۳۰۶	۱۸/۳۳۲	۸۸/۵۷۷



شکل ۱۴. مقدار جابه‌جایی در پره‌ای جنس فولاد آلیاژی



شکل ۱۳. تنش ون مایسز در پره‌ای از جنس فولاد آلیاژی



شکل ۱۵. مقدار کشیدگی معادل در پره‌ای از جنس فولاد آلیاژی



#### ۴. نتیجه گیری

معنی ناکارآمدی فیبر کربن نیست؛ زیرا داده‌های مورد نیاز، تنش برشی، نیروی معادل، تنش ون مایسز و نیروی به‌وجود آمده توسط باد می‌باشد که در تمامی اینها کمترین میزان به همین جنس وارد می‌شود. مهمترین فاکتور در انتخاب این مواد سبک‌بودن آنهاست. چگالی جرمی (کیلوگرم بر متر مکعب) برای آلیاژ آلومینیوم، فولاد آلیاژی و الیاف کربن به ترتیب ۲۶۶۰، ۷۷۰۰ و ۱۷۸۰ می‌باشد [۱۶-۱۷]. با توجه به چگالی استنباط می‌شود که در ابعاد بزرگتر وزن ماده بسیار تأثیرگذار می‌باشد. بدین ترتیب با مقایسه مواد مورد بررسی مشاهده می‌شود که جنس فیبر کربن بسیار کمتر از بقیه می‌باشد که این یک نوع برتری خاص به این ماده می‌دهد. همچنین با توجه به اینکه دیگر مشخصات الیاف کربن حاکی از آن است که تحمل بسیار بالایی در برابر نیرو و تنش دارد بهترین انتخاب در تهیه پره توربین می‌تواند فیبر کربن باشد، همین امر باعث شده است که در دهه اخیر کشور ایالات متحده آمریکا جنس پره‌های خود را از مواد فلزی به سمت پلاستیک‌های فشرده با چگالی پایین انتخاب نموده و در چند سال اخیر به سمت فیبر کربن روی آورده است.

با توجه به تحلیل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که در بازه زمانی یک سال وضعیت جوی چه اثری روی پره‌های توربین با مواد مورد نظر می‌گذارد. کمترین میزان تنش به پره‌ای به جنس فیبر کربن وارد می‌شود، این مقدار با توجه به مقادیر بیشینه نیز قابل تشخیص است؛ به‌گونه‌ای که در حالت بیشینه، بیشترین تنش که به پره‌ای با همان جنس وارد می‌شود برابر با  $16/71$  پاسکال است که در مقایسه با تنش وارده بر دیگر پره‌ها، که به جنس دیگری مسلح است، کمترین می‌باشد. همچنین در قسمت شبیه‌سازی نیرو مشاهده می‌شود که تنش ون مایسز، که یکی از کلیدی‌ترین قسمت‌های شبیه‌سازی است، میزان تنش ون مایسز فیبر کربن کمتر از دیگر مواد می‌باشد. در قسمت جابه‌جایی و همچنین کشیدگی معادل هم مطابق انتظار برآورده شده است؛ زیرا مدول الاستیک ماده‌های دیگر به‌خاطر جنس فلزی آنها بسیار بالاست و برای خم‌شدن آن و کشیدگی در برابر نیرو مقاومت بیشتری دارند. چون جنس فیبر کربن از نوع ترد می‌باشد، مدول الاستیک آن به مراتب کمتر از فلزات است و مقادیر کشیدگی معادل و جابه‌جایی آن بیشتر است، اما این به

#### ۵. مأخذ

- [7] Tony Burton, Nick Jenkins, David Sharpe, Ervin Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, second edition, John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [8] Rudbar Wind Farm, [www.en.wikipedia.org](http://www.en.wikipedia.org), (accessed 20 Jun 2017).
- [9] [www.gilmet.ir/fa/menu47.aspx](http://www.gilmet.ir/fa/menu47.aspx) (accessed 20 Jun 2017).
- [۱۰] ف. ترابی، ر. حامدی، محاسبه پروفیل سرعت در فواصل مختلف پشت توربین‌های بادی تحت تاثیر جریان‌های آشفته، ششمین همایش علمی تخصصی انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد، تهران، ۱۳۹۳.
- [11] [www.matweb.com](http://www.matweb.com) (accessed 20 Jun 2017).
- [12] [www.hexcel.com](http://www.hexcel.com) (accessed 20 Jun 2017).
- [13] [www.hexcel.com](http://www.hexcel.com) (accessed 20 Jun 2017).
- [14] [www.christinedemerchant.com](http://www.christinedemerchant.com) (accessed 20 Jun 2017).
- [15] [www.lookpolymers.com](http://www.lookpolymers.com) (accessed 20 Jun 2017).

- [۱] غ. رحیمی، ص. احمدی، معرفی توربین بادی ساوونبوس، مهندسی مکانیک، س. ۲۴، ش. ۱۰۴، ۱۳۹۴.
- [۲] ر. حربی منفرد، ج. پیرکندی، توربین‌های بادی نوین و نقش آنها در آینده سیستم‌های انرژی، مهندسی مکانیک، س. ۲۵، ش. ۱۰۸، ۱۳۹۵.
- [۳] م. محمدی، م. ر. محمدی، ع. محمدی، توربین‌های عالی مرتفع، مهندسی مکانیک، س. ۲۲، ش. ۸۹، ۱۳۹۲.
- [۴] ا. هرسینی، ع. حاجی‌زاده، مروری بر روش‌های مختلف پایش وضعیت توربین بادی، مهندسی مکانیک، س. ۲۵، ش. ۱۰۷، ۱۳۹۵.
- [5] [www.windustry.com](http://www.windustry.com), (accessed 20 June 2017)
- [6] Peter J. Schubel, Richard J. Crossley, *Wind Turbine Blade Design, Energies*, Vol. 5, 2012, pp. 3425-3449.

- [22] Solidworks flow simulation-version 2016 & 2015.
- [23] SolidWorks® 2010 Bible, Wiley Publishing, Inc., 2010.
- [24] What's new Solidworks 2016, Microsoft Corporation, All rights reserve, 2015.
- [25] Hansen Martin. O. L., *Aerodynamics of Wind Turbines*, second edition. Earthscan Publishes, London, UK, 2008.
- [26] Habibi Nabard, Vahdatpanh Danial, Zandipour Kani., Shear stress distribution on turbine blades in Manjil weather conditions in laboratory scale, International Conference on researches in Science and Engineering, 28 July 2016, Istanbul University, Turkey.
- [27] Povl Brondsted and Rogier P. L. Nijssen., *Advances in wind turbine blade design and materials*, Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [16] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, John T. DeWolf, David F. Mazurek, *Mechanics of materials* (seven edition), 2016.
- [17] Richard Budynas, Keith Nisbett., *Shigley's mechanical engineering design*, 9<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill education, 2010.
- [18] Y. Blades, *Hybrid Anisotropic Materials for Wind Power Turbine Blades*, Golfman, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2012.
- [19] I. C. Dimitrios, *Structural Analysis of Composite Wind Turbine Blades*, Vol. 1: Nonlinear Mechanics and Finite Element Models with Material Damping, Springer International Publishing Switzerland 2013.
- [20] Gustave Paul Corten., *Flow Separation on Wind Turbine Blades*, Gustave Paul Corten, Geboren op 8 September 1968, Rotterdam.
- [21] Solidworks simulation-version 2016.