

بررسی اثرات زبری بر کارایی آئرودینامیکی مقطع پره توربین باد

محمد رضا سلطانی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

فرشید عسکری سیدشکری (کارشناس ارشد)

پژوهشکده‌ی شهید یزدانی

علی بخشعلی پورکلخوران (دانشجوی دکتری)

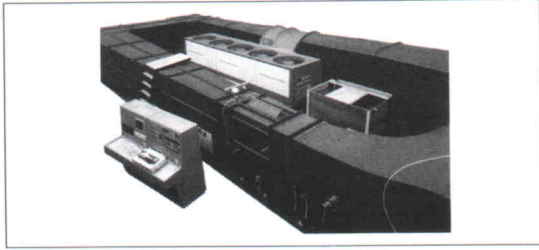
دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

به منظور بررسی رفتار آئرودینامیکی مقطع پره توربین‌های باد، آزمایش‌های مختلفی بر روی یکی از مقاطع به‌کار رفته در پره توربین برق بادی ۶۶۰ کیلوواتی در رینولدزهای مختلف انجام شده است. اثرات زبری بر توزیع فشار، ضرایب و پارامترهای آئرودینامیکی مقطع در سه عدد رینولدز به دست آمده است. نتایج به دست آمده حاکی از اثرات نامطلوب زبری بر کارایی آئرودینامیکی مقطع، شامل کاهش ضریب برآ و افزایش پسا در کلیه‌ی اعداد رینولدز مورد آزمایش است. زبری باعث از بین رفتن نقطه‌ی گذار در زوایای حمله‌ی پایین و افت شدید مقدار ضریب فشار در سطح بالایی، و نیز افزایش ناحیه‌ی جدا شده‌ی جریان در زوایای حمله‌ی بالا شده است. افزایش عدد رینولدز موجب افزایش کارایی آئرودینامیکی ایرفویل شده، اما برخلاف انتظار تأثیری بر کاهش اثرات نامطلوب زبری نداشته است. نتایج به دست آمده به طور غیرمستقیم مؤید تشکیل حباب روی سطح بالای ایرفویل در رینولدزهای پایین است. به منظور اعتبارسنجی کدهای مهندسی Xfoil و Eppler نتایج آزمایش‌ها با پیش‌بینی این کدها و نرم‌افزار Fluent مقایسه شده است.

مقدمه

زبری لایه‌ی حمله^۱ ضخامت لایه‌ی مرزی روی پره را زیاد کرده و باعث حرکت نقطه‌ی گذار به سمت لایه‌ی حمله‌ی ایرفویل می‌شود. در نتیجه لایه‌ی مرزی مغشوش و ضخیم‌تر شده، باعث افزایش پسا و کاهش انحنای مؤثر ایرفویل و واماندگی زودرس خواهد شد. در کل می‌توان گفت که زبری اثرات بسیار نامطلوبی بر کارایی پره خواهد داشت و مقدار این اثر در کاهش بیشینه‌ی ضریب برآ به فلسفه‌ی طراحی ایرفویل و درجه‌ی آلودگی روی آن بستگی دارد.^[۵] ضخامت مقطع در طول پره‌ی توربین‌های باد به منظور تحمل بارهای سازه‌ی به شدت تغییر می‌کند، به نحوی که ضخامت مقطع در ریشه‌ی پره‌ها به ۳۰٪ نیز می‌رسد. تاکنون آزمایش‌های زیادی بر روی این نوع ایرفویل‌های ضخیم که در ریشه‌ی پره کاربرد دارند انجام گرفته است.^[۶] با توجه به این که اثرات عواملی همانند «زبری» به ندرت و بسیار اندک بر روی مقاطعی که ضخامت متوسطی دارند بررسی شده است، این تحقیق بر بررسی مقطعی که در قسمت بیرونی پره قرار دارد متمرکز شده است. بررسی‌ها نشان داده است که مقطع پره‌های توربین‌های باد در فاصله‌ی حدود ۷۵٪ شعاع پره از مرکز چرخش بیشترین سهم را در تولید نیرو و گشتاور دارد.^[۷] به همین منظور مقطع ۱۶ متر از یک پره ۲۳/۵ متری مربوط به توربین برق بادی ۶۶۰ کیلووات که قرار است به زودی در کشور نصب و راه‌اندازی شود مدل شد و در تونل باد مورد بررسی تجربی قرار گرفت و اثرات پارامترهای مختلفی چون زبری و عدد

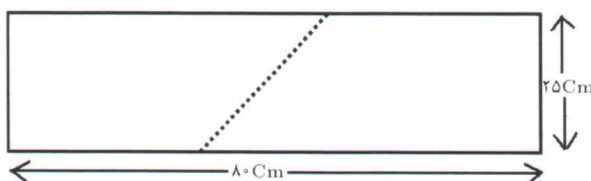
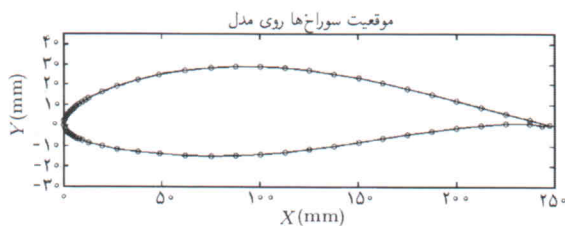
در فرایند طراحی توربین‌های باد، تخمین کارایی آئرودینامیکی پره و مقطع آن به منظور پیش‌بینی توان خروجی الزامی است. برای پیش‌بینی کارایی آئرودینامیکی توربین‌های بادی محور افقی و طراحی آنها، چندین روش وجود دارد که از بین آنها روش BEM بسیار متداول است. برای استفاده از این روش طراحی بایستی مشخصات عملکردی مقاطع پره توربین را در قالب یک جدول به دست آورد.^[۱] بنابراین انجام آزمایش تونل باد برای مقاطع پره ضروری به نظر می‌رسد، به‌ویژه آن که این توربین‌ها در زوایای حمله بالا کاربرد دارد، لذا کدهای موجود قادر به پیش‌بینی دقیق ضرایب نیستند. این امر سبب می‌شود که همواره توان محاسبه شده توسط نرم‌افزار BEM با استفاده از نتایج کدهای موجود با توان اندازه‌گیری شده اختلاف فاحشی داشته باشد، به‌ویژه آن که محاسبه‌ی نادرست نیروهای آئرودینامیکی اثرات نامطلوبی بر سازه‌ی توربین دارد. تحلیل‌ها نشان داده است که استفاده از نتایج آزمایش ایرفویل در تونل‌های مختلف تأثیر بسیار زیادی بر نتایج پیش‌بینی شده دارد که این امر ناشی از نادیده گرفتن اثرات پارامترهای مختلف و اندازه‌ی آنها (همانند زبری، تلاطم جریان، واماندگی دینامیکی و ...) است.^[۲] از آنجا که توربین‌های باد در شرایط محیطی در معرض باد، باران و گرد و غبار قرار می‌گیرند، و نیز گذشت زمان باعث تجمع لاشه‌ی حشرات روی پره آنها می‌شود، بررسی اثرات زبری بر عملکرد و کارایی مقطع پره حائز اهمیت است.



شکل ۱. شماتیک تونل باد.

تونل باد و به طول ۸ سانتی متر ساخته شده است. با توجه به ارتفاع مقطع کاری تونل، طول وتر^۵ ۲۵ سانتی متر در نظر گرفته شده تا هنگامی که ایرفویل در زوایای حمله‌ی بالا قرار می‌گیرد از خفگی تونل جلوگیری شود. مدل از جنس مرکب ساخته شده است. برای آنکه امکان اتصال لوله‌های فشار وجود داشته باشد، لازم است این گونه مدل‌ها چندتکه ساخته شوند. مدل این آزمایش در ابتدا برای عبور لوله‌های فشار دوتکه ساخته شده و پس از تزریق مواد مرکب به داخل آن به صورت یکپارچه در آمده است.

برای اندازه‌گیری فشار در سطح مدل، سوراخ‌های فشار استاتیکی در محل‌های تعیین شده با قطر داخلی ۰/۸ میلی‌متر و قطر خارجی ۱ میلی‌متر کاملاً عمود بر سطح ایجاد شده است. تعداد ۶۴ سوراخ فشار بر روی سطح مدل تعبیه شده است. چیدمان سوراخ‌ها با توجه به توزیع فشار پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزارهای عددی، با تراکم بیشتر در لبه‌ی حمله و حول یک خط مورب با زاویه‌ی ۲۰ درجه در وسط مدل به منظور جلوگیری از تأثیر احتمالی دنباله‌ی جریان ناشی از سوراخ‌ها بر روی یکدیگر در نظر گرفته شده است (شکل ۲). فاصله‌ی لوله‌ی رابط بین سوراخ‌های روی مدل تا سر فشارسنج‌ها حداکثر ۲ متر است. ضخامت مدل مورد استفاده ۱۷/۵۴٪ (۴/۳۸ سانتی‌متر) است. سطح خارجی مدل کاملاً صیقلی است و برای شبیه‌سازی اثر زبری بر روی آن از زبری شماره ۳۶ (با قطر اسمی ۲۵۴/۰ اینچ) استفاده شده



شکل ۲. مدل مورد آزمایش و موقعیت نصب سوراخ‌ها بر روی آن.

رینولدز بر روی آن بررسی شد. لازم به ذکر است که اطلاعات کارایی این توربین‌ها، مثل ضرایب آئرو دینامیکی و اثرات ناشی از زبری و ... در دست نیست و صرفاً قرار است این پره‌ها در داخل کشور مونتاژ شوند. لذا به منظور بررسی رفتار آئرو دینامیکی و کارایی پره برنامه گسترده‌ی، شامل آزمون‌های استاتیکی و دینامیکی مقطع پره، در نظر گرفته شده است. در این نوشتار صرفاً نتایج آزمون‌های استاتیکی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. ضرایب آئرو دینامیکی به دست آمده همگی ناشی از توزیع فشار حول ایرفویل و دنباله‌ی آن بوده و در انجام آزمایش‌ها از بالانس استفاده نشده است. ضرایب برآ و ممان پیچشی از توزیع فشار حول مدل، و ضریب پسا از توزیع سرعت در دنباله‌ی جریان استخراج شده‌اند. بر روی ضرایب آئرو دینامیکی ارائه شده، به علت اثرات دیواره و خفگی تونل^۲ اصلاحاتی اعمال شده است.^[۸] به منظور کالیبراسیون کدهای مهندسی برای استفاده از آنها در سایر مقاطع پره، نتایج آزمون با پیش‌بینی انجام شده توسط کدها در مقطع مورد نظر مقایسه شده است. امید است که با استفاده از نتایج این آزمایشات و آزمایش‌های دیگر بتوان کارایی این پره را دقیقاً محاسبه کرد تا پیش‌بینی دقیق‌تری از توان آن حاصل آید.

تجهیزات آزمایش

کلیه آزمایش‌ها در تونل باد مادون صوت مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی مرکز فارس انجام شده است. در این آزمایش‌ها از تونل باد، برد A/D مدل AT-MIO-۶۴E-۳، ریک، سیستم نقطه‌یابی^۳، ترانسدیوسر فشاری، برد اخذ اطلاعات و رایانه برای ثبت و پردازش داده‌ها استفاده شده است.

تونل باد

تونل باد مادون صوت مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی مرکز فارس که آزمایش‌ها در آن انجام شده دارای محفظه‌ی آزمایش ۸/۰ × ۸/۰ × ۲ متر مکعب با محدوده‌ی سرعت ۱۰ تا ۱۰۰ متر بر ثانیه است. این تونل ساخت کارخانه‌ی ISI ایتالیا، و از نوع مدار بسته است و ابعاد کلی آن ۱۸ × ۶/۵ × ۳/۸ متر است. قدرت فن ۱۵۰ کیلووات و سرعت چرخش آن ۹۸۵ RPM است. دبی جریان هوا بین ۶/۴ تا ۶۴ متر مکعب بر ثانیه قابل تنظیم است. شکل ۱ شماتیک تونل باد را نشان می‌دهد.

مدل

مدل ایرفویل مورد آزمایش، مقطع ۱۶ متری شعاع از پره‌ی ۲۳/۵ متری توربین برق بادی ۶۶۰ کیلووات است، و از آنجا که آزمون تونل به صورت دوعبده‌ی انجام می‌گیرد دهانه‌ی مدل^۴ هم عرض با دهانه‌ی مقطع کاری

استفاده شده است. ترانسدیوسرهای مورد استفاده از نوع تفاضلی اند و اختلاف فشار نسبی را اندازه‌گیری می‌کنند. ولتاژ تغذیه‌ی ورودی این ترانسدیوسرها 1 ± 0.08 ولت جریان مستقیم است و هنگامی که اختلاف فشار دو سر آن صفر باشد، ولتاژ خروجی آن در حدود 2.3 تا 4.3 ولت است. زمان پاسخ‌گویی ترانسدیوسرها به تغییرات فشاری 1 ± 0.01 ثانیه است. ولتاژ خروجی ترانسدیوسرها بین 1 تا 6 ولت بر حسب اختلاف فشار دوسر تغییر می‌کند. کلیه‌ی سیستم‌های منبع تغذیه، نصب و راه‌اندازی ترانسدیوسرها در حین این پروژه، طراحی و ساخته شده ضمن اینکه قبل از انجام این آزمایشات تمامی ترانسدیوسرها با استفاده از یک ترانسدیوسر بسیار دقیق کالیبره شده‌اند. دقت سیستم طراحی و ساخته شده در آزمایش‌های انجام شده در حدود 6 پاسکال بوده است.

برد اخذ و پردازش اطلاعات و رایانه

در انجام آزمایش‌ها از یک برد AT-MIO-64E-3 A/D و رایانه‌ی برای اخذ، ثبت و پردازش اطلاعات استفاده شده است. فرکانس داده‌برداری در حین آزمایش 100 هرتز و به مدت 3 ثانیه در هر موقعیت داده اخذ شده است.

سیم داغ^۷

برای اندازه‌گیری شدت تلاطم (آشفستگی) در مقطع کاری تونل از سیم داغ یک مؤلفه و متعلقات آن استفاده شده است. به‌منظور اخذ و پردازش اطلاعات سیم داغ، از یک برد آنالوگ به دیجیتال 16 کاناله‌ی PCL816-HG استفاده شده است. بعد از کالیبراسیون سیم داغ و فیلتر کردن داده‌ها توسط نرم‌افزاری که در این پروژه نوشته شده، شدت تلاطم در مقطع کاری تونل در سرعت‌های مختلف به‌دست آمده است.

مراحل انجام آزمایش

در این پژوهش آزمایش‌های مختلفی در تونل باد مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی شیراز در سه عدد رینولدز $10^6 \times 43$ ، $10^6 \times 85$ و $10^6 \times 1/3$ انجام شد. در هر حالت، زاویه‌ی حمله‌ی مدل از -5 تا 25 درجه با گام‌های 1 و 2 درجه متغیر است. توزیع فشار روی مدل در 64 موقعیت و حول یک خط مورب با زاویه‌ی 20 درجه به‌وسیله‌ی حس‌گرهای فشارسنج اخذ می‌شود. از توزیع فشار حول مدل برای به دست آوردن ضریب برآ و ضریب ممان پیچشی استفاده شده است. به‌منظور کسب ضریب پسا، توزیع سرعت در دنباله‌ی مدل به‌وسیله‌ی یک دستگاه ریک اندازه‌گیری شده است. از آنجا که امکان رسم هم‌زمان

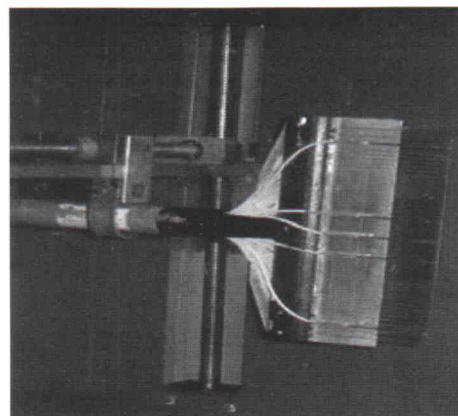
است که به‌وسیله‌ی یک چسب دوطرفه به پهنای $1/5$ سانتی‌متر در نزدیکی لبه‌ی حمله (5% وتر) و بر روی سطح بالایی قرار داده می‌شود. به‌منظور آشکارسازی جریان به سطح مدل رنگ سیاه زده شده که در هنگام استفاده از رنگ فلورسانس در موقع آشکارسازی، بازتابش نور بهتر صورت گیرد. مقطع ایرفویل به‌کار رفته در پره‌ی این توربین در بعضی از مقاطع مشابه ایرفویل‌های سری 6 NACA است، اما از لحاظ ضخامت قدری متفاوت است.

ریک^۶

این وسیله برای اندازه‌گیری فشار استاتیک و فشار کل صفحات مختلف تونل به کار گرفته می‌شود. با حرکت دادن ریک در محور طولی و عرضی تونل در صفحات مختلف، می‌توان توپوگرافی سرعت و فشار را در اعداد مختلف رینولدز اندازه‌گیری کرد و تغییرات آنها را در صورت امکان مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق، برای اندازه‌گیری توزیع فشار در دنباله‌ی جریان یک ریک با 72 لوله (67 لوله فشار کل و 5 لوله فشار استاتیک) طراحی و ساخته شد. دهانه‌ی ریک ساخته شده برای این آزمایش‌ها 30 سانتی‌متر بوده و تراکم لوله‌ها در وسط دهانه بیشتر است. فاصله‌ی مراکز لوله‌ها در وسط ریک 3 میلی‌متر و در کناره‌ها به 1 سانتی‌متر افزایش می‌یابد. قطر لوله‌های به‌کار رفته $2/2$ میلی‌متر و از جنس استیل است. شکل 3 ریک به‌کار گرفته شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

ترانسدیوسرهای فشاری

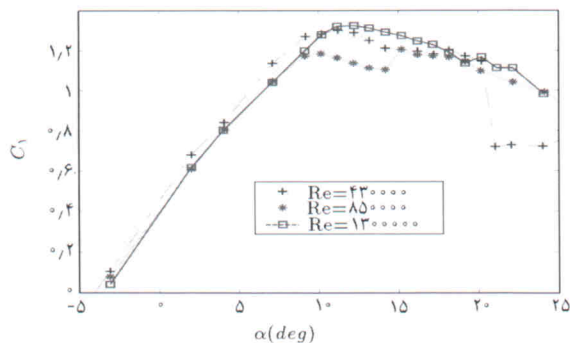
ترانسدیوسرهای مورد استفاده در آزمایش‌ها، 45 عدد از نوع $PC^{\circ} 5D$ و 143 عدد از نوع $PC^{\circ} 1D$ با محدوده‌ی فشار $5 \pm$ psi و 25 عدد از نوع $PC^{\circ} 1D$ با محدوده‌ی فشار $1 \pm$ psi هستند. از ترانسدیوسرهای نوع اول در لبه‌ی حمله و از نوع دوم آن در انتهای مدل (که گرادیان فشار کاهش می‌یابد)



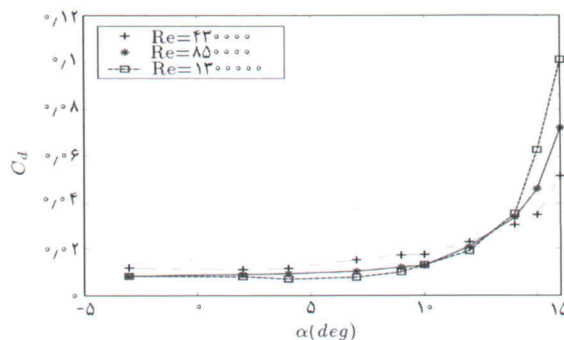
شکل 3. ریک مورد استفاده در آزمایش‌ها.

که از این شکل پیداست رفتار ایرفویل در رینولدز $10^6 \times 43^\circ$ با دو رینولدز دیگر کاملاً متفاوت است. به نظر می‌رسد علت این پدیده در رینولدزهای پایین، تشکیل حباب^۸ در سطح بالایی مدل است که باعث افزایش ضخامت ایرفویل و در نتیجه تغییر انحنای مؤثر شده است. جدایش کامل جریان روی ایرفویل در این عدد رینولدز و در زاویه‌ی حمله‌ی ۲۱ درجه اتفاق افتاده است. تغییرات ضریب برآ در رینولدزهای $10^6 \times 85^\circ$ و $10^6 \times 43^\circ$ تا قبل از زاویه‌ی حمله‌ی ۹ درجه مشابه است و در زوایای حمله‌ی بالاتر ایرفویل در رینولدز $10^6 \times 85^\circ$ دچار واماندگی می‌شود. با افزایش عدد رینولدز به $10^6 \times 43^\circ$ زاویه‌ی واماندگی حداقل تا ۲ درجه به تعویق افتاده و در نتیجه بیشینه‌ی برآی ایرفویل ۱۰٪ افزایش پیدا کرده است و از $1/19$ در رینولدز $10^6 \times 85^\circ$ به $1/33$ در رینولدز $10^6 \times 43^\circ$ رسیده است.

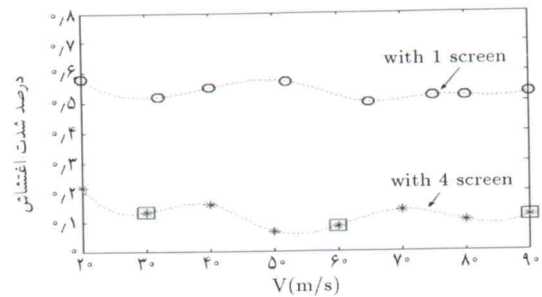
شکل ۶ تغییرات ضریب پسا برحسب زاویه‌ی حمله را در سه عدد رینولدز آزمایش‌ها نشان می‌دهد. به علت وجود حباب و افزایش ضخامت ظاهری مدل در رینولدز $10^6 \times 43^\circ$ پسای ایرفویل حداقل ۱۵٪ نسبت به رینولدز $10^6 \times 85^\circ$ رشد داشته است. مقایسه‌ی این ضریب در رینولدزهای $10^6 \times 85^\circ$ و $10^6 \times 43^\circ$ نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز به کاهش ۱۰٪ مقدار پسا در زوایای حمله‌ی قبل از واماندگی انجامیده است. تأثیر افزایش عدد رینولدز در



شکل ۵. تغییرات ضریب برآ برحسب زاویه‌ی حمله در رینولدزهای مختلف.



شکل ۶. تغییرات ضریب پسا برحسب زاویه‌ی حمله در رینولدزهای مختلف.



شکل ۴. اثر نصب توری‌ها در کاهش شدت تلاطم مقطع.

جدول ۱. شدت تلاطم جریان در مقطع کاری تونل باد بر حسب درصد.

عدد رینولدز	۴۳۰,۰۰۰	۸۵۰,۰۰۰	۱,۳۰۰,۰۰۰
شدت تلاطم (درصد)	۰,۱۳۲۸	۰,۰۸۵۰۴	۰,۱۱۷۵

توزیع سرعت در دنباله (حین آزمایش) وجود داشت، سعی شده است مرکز ریک همواره در مرکز دنباله‌ی جریان قرار داده شود.

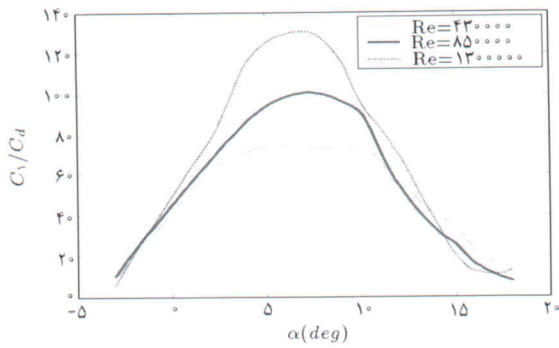
برای بررسی اثرات زبری بر مدل از زبری شماره ۳۶ با قطر اسمی 0.254° اینچ استفاده شده است. این نوع زبری به‌وسیله‌ی یک چسب دوطرفه به پهنای $1/5$ سانتی‌متر و در فاصله‌ی ۵٪ وتر از لبه‌ی حمله بر روی مدل در سطح بالایی نصب شد. اثرات زبری در سه عدد رینولدز ذکر شده بررسی شده است.

یکی از پارامترهای اثرگذار در نتایج آزمایش‌های تونل باد، شدت تلاطم (آشفتنگی) در مقطع کاری است که باعث جابه‌جایی نقطه‌ی گذار روی مدل و تغییر پارامترهای آئرو دینامیکی می‌شود. قبل از انجام آزمایش‌ها شدت تلاطم در مقطع کاری تونل اندازه‌گیری شد و نتایج نشان داد که این مقدار بیش از حد استاندارد است. برای کاهش شدت تلاطم در مقطع کاری روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، که در این تحقیق نیز مورد استفاده قرار گرفت، قرار دادن توری‌هایی با شبکه‌ی ریز در قسمتی از تونل و قبل از هم‌گرایی محفظه‌ی جریان و در ناحیه‌ی سرعت پایین است. تونل باد مذکور مجهز به یک عدد توری است و قبل از انجام آزمایش‌ها سه عدد توری دیگر در تونل نصب شد که شدت تلاطم را در مقطع کاری تونل به شدت کاهش داد. شکل ۴ اثر نصب این توری‌ها را بر کاهش شدت تلاطم مقطع کاری نشان می‌دهد.

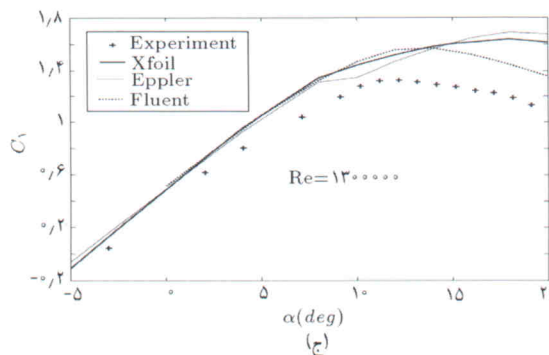
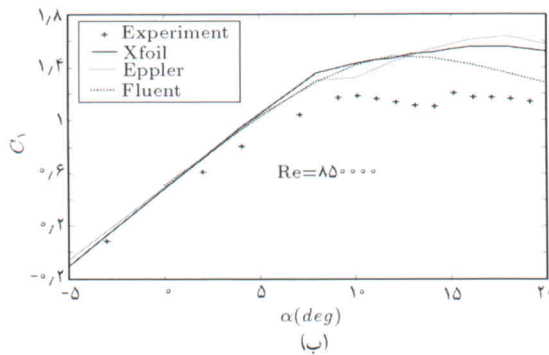
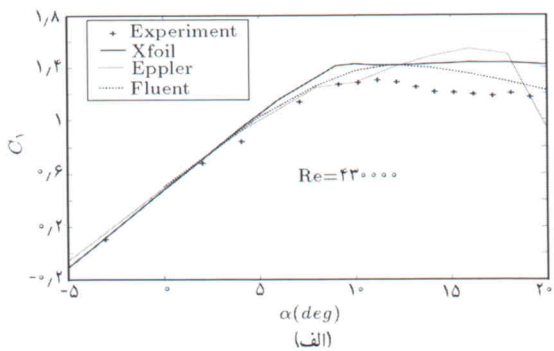
جدول ۱ نشان‌گر شدت تلاطم در داخل مقطع کاری تونل است که به‌وسیله‌ی سیم‌داغ در سه عدد رینولدز آزمایش‌ها اندازه‌گیری شده است.

نتایج

شکل ۵ تغییرات ضریب برآ برحسب زاویه‌ی حمله را در سه عدد رینولدز $10^6 \times 43^\circ$ ، $10^6 \times 85^\circ$ و $10^6 \times 132^\circ$ نشان می‌دهد. همان‌طور



شکل ۷. تغییرات نسبت برآ به پسا در رینولدزهای مختلف.



شکل ۸. مقایسه‌ی ضریب برآ با پیش‌بینی کدهای مهندسی.

تأثیری در کاهش اثرات نامطلوب زبری بر ایرفویل ندارد و این اثرات در رینولدز $1/3 \times 10^6$ بسیار شدید است.

شکل ۱۱ اثر زبری شماره ۳۶ را بر روی مقدار ضریب پسا نشان می‌دهد. تأثیر بسیار شدید زبری بر ضریب پسا کاملاً مشخص است و

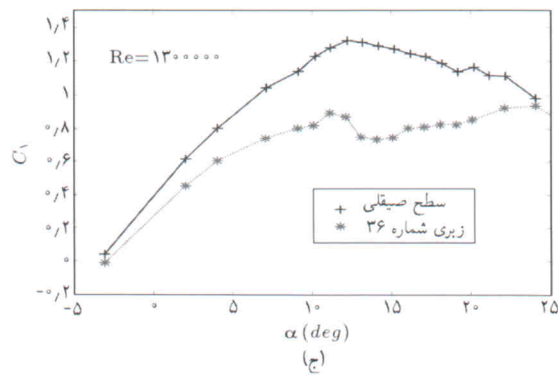
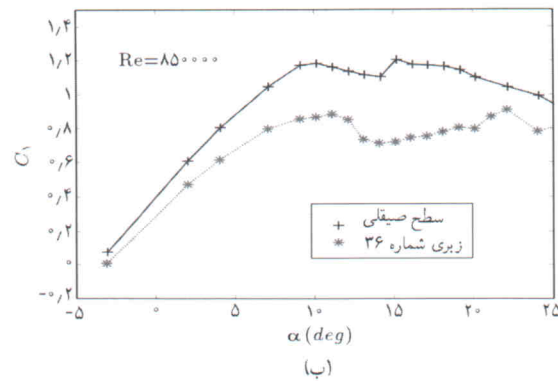
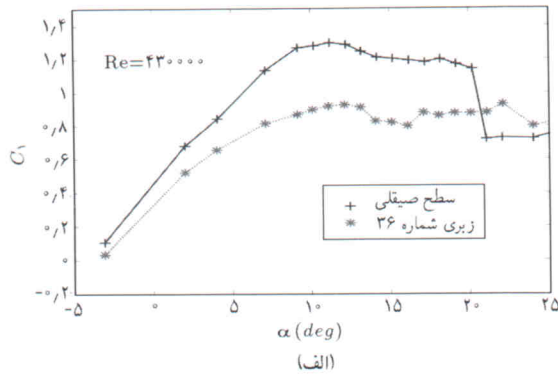
کاهش ضریب پسا در زوایای حمله‌ی قبل از واماندگی کاملاً مشهود است.

شکل ۷ تأثیر عدد رینولدز بر نسبت ضریب برآ به پسا را نشان می‌دهد. این نسبت در رینولدزهای $1/3 \times 10^6$ ، $0/43 \times 10^6$ ، $0/85 \times 10^6$ و $1/3 \times 10^6$ به ترتیب به ۷۵، ۱۰۰ و ۱۳۰ می‌رسد که نشان از تأثیر مطلوب افزایش عدد رینولدز بر کارایی آئرو دینامیکی مقطع دارد.

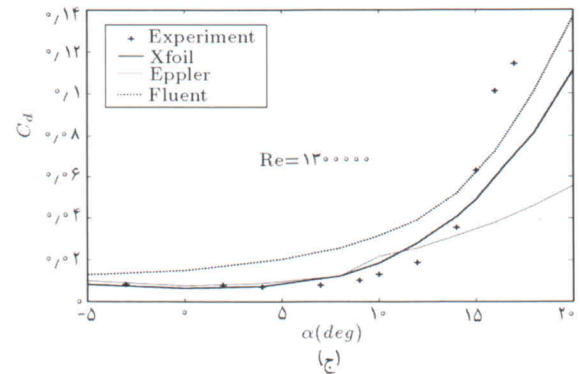
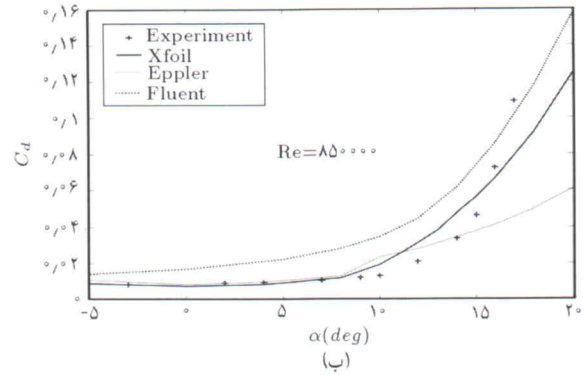
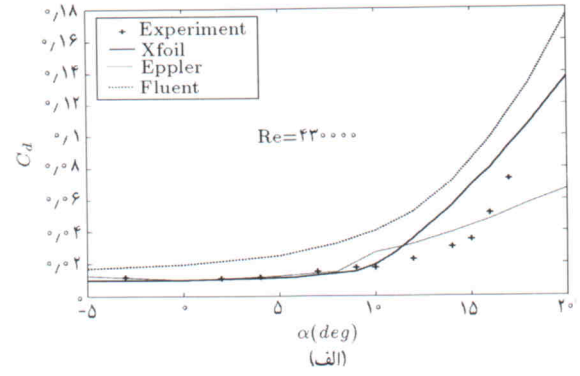
در شکل‌های ۸ و ۹ ضرایب برآ و پسا با پیش‌بینی انجام شده توسط کدهای مهندسی Xfoil، Eppler و Fluent مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که پیش‌بینی بیشینه‌ی ضریب برآ برای مدل بسیار مشکل است و در زوایای قبل از واماندگی نیز مقادیر پیش‌بینی شده بیش از نتایج تجربی است. و با افزایش عدد رینولدز این اختلاف افزایش پیدا می‌کند. هرچند که Fluent ضریب برآ را بهتر پیش‌بینی می‌کند. لازم به ذکر است که پیش‌بینی کدهایی مانند Xfoil و Eppler در رینولدزهای پایین دقت خوبی دارند. شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز خطای پیش‌بینی ضریب برآ توسط کدها، حتی در زوایای حمله‌ی پایین، نیز افزایش می‌یابد. پیش‌بینی صورت گرفته توسط کدهای مهندسی در مورد ضریب پسا در زوایای قبل از واماندگی در رینولدزهای $1/3 \times 10^6$ و $0/85 \times 10^6$ مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد و خطای آن کم‌تر از ۵٪ است. پیش‌بینی ضریب پسا در رینولدز $0/43 \times 10^6$ تا حدودی کم‌تر از مقدار واقعی است. همان‌طور که اشاره شد تشکیل حباب در این عدد رینولدز باعث افزایش پسا شده است و کدهای مهندسی قادر به تشخیص حباب نیستند. در نتیجه مقدار پیش‌بینی کم‌تر از میزان واقعی است. لازم به ذکر است پیش‌بینی ضریب پسا توسط کدهای عددی به نوع شبکه و روش مورد استفاده، به علت لایه‌ی مرزی لزج، بسیار وابسته است. شبکه‌ی به‌کار رفته در مورد این مسئله از نوع باسازمان و با ۲۵ هزار حجم محدود و روش مورد استفاده مدل آشفتگی یک معادله‌ی اسپالارت - الماراس است. بنابراین به نظر می‌رسد که برای پیش‌بینی کارایی این ایرفویل و تعیین پیش‌بینی توان پره توربین نیازمند به انجام آزمایشات در تونل باد است.

تأثیر زبری

شکل ۱۰ تأثیر زبری شماره ۳۶ را بر روی مقدار ضریب برآ در رینولدزهای مختلف نشان می‌دهد. زبری باعث افت ۲۷ درصدی بیشینه‌ی ضریب برآ در رینولدز $1/3 \times 10^6$ ، ۲۵ درصد در رینولدز $0/85 \times 10^6$ و ۳۳ درصد در رینولدز $1/3 \times 10^6$ شده است. زبری همچنین سبب تعویق واماندگی در رینولدزهای $0/43 \times 10^6$ و $1/3 \times 10^6$ شده است. برخلاف انتظار، افزایش عدد رینولدز



شکل ۱۰. تأثیر زبری شماره ۳۶ بر روی ضریب برآ در رینولدزهای مختلف.



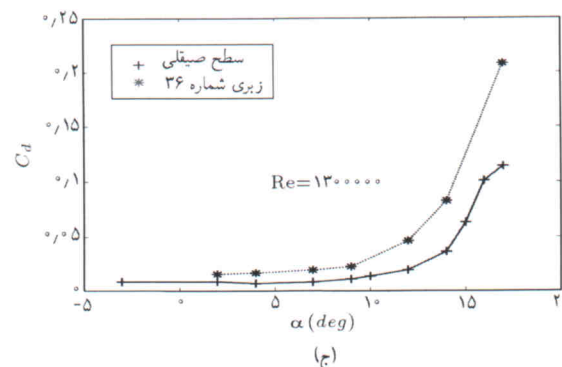
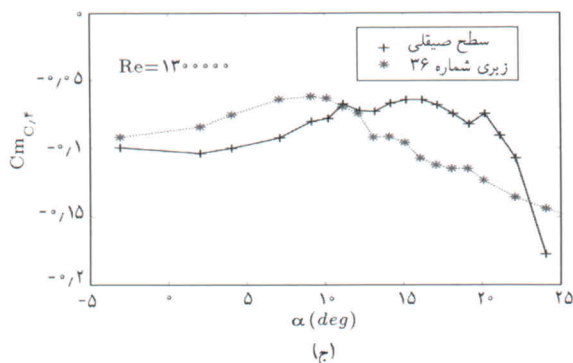
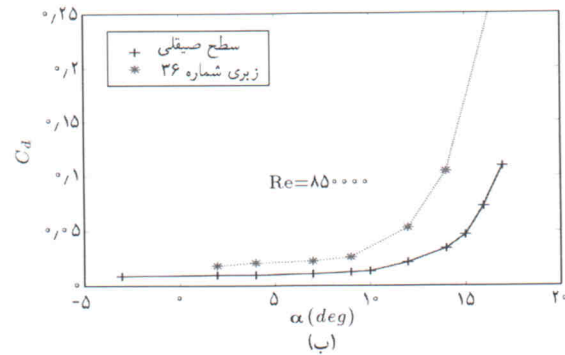
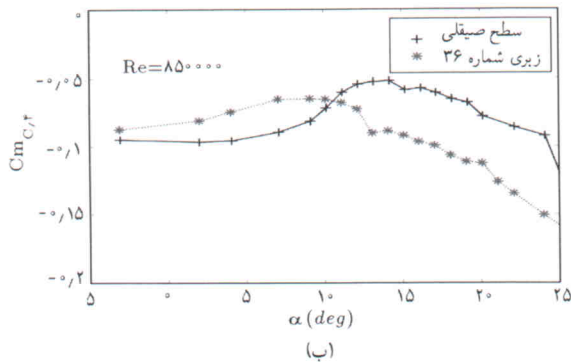
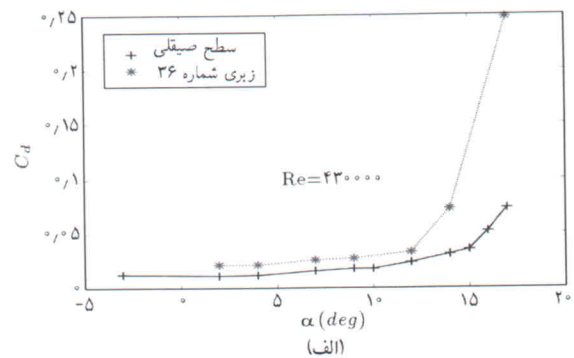
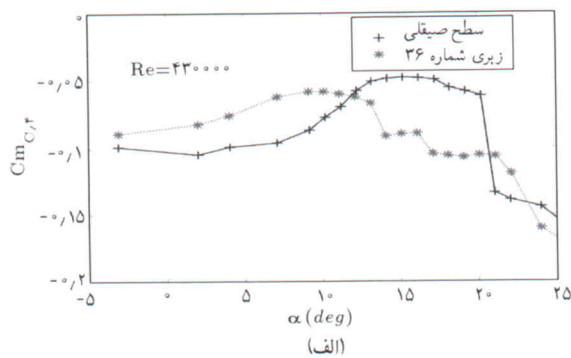
شکل ۹. مقایسه‌ی ضریب پسا با پیش‌بینی کدهای مهندسی.

ضریب برآ، ممان پیچشی حول ۲۵٪ وتر در زوایای قبل از واماندگی به واسطه‌ی زبری کاهش پیدا می‌کند اما بعد از واماندگی این اثر معکوس می‌شود. تغییرات برحسب زاویه‌ی حمله تقریباً ناچیز است.

شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ اثر زبری بر توزیع فشار حول ایرفویل را در رینولدزهای $10^6 \times 43$ ، $10^6 \times 85$ و $10^6 \times 13$ و هر یک را در چهار زاویه حمله‌ی ۲، ۷، ۱۲ و ۱۷ درجه نشان می‌دهند. زبری باعث افت شدید بیشینه‌ی ضریب فشار روی سطح بالایی مدل و افزایش ناحیه‌ی جریان جدا شده در زوایای حمله‌ی بالا شده است. افزایش ناحیه‌ی جدا شده‌ی جریان به واسطه‌ی زبری در زوایای حمله‌ی ۱۲ و ۱۷ درجه کاملاً مشخص است. در حالی که جریان در رینولدز $10^6 \times 43$ در زاویه حمله‌ی ۱۷ درجه از ۵۰٪ سطح بالایی جدا شده بر اثر زبری به ۷۵٪ افزایش یافته، سطح جدا شده‌ی جریان در

باعث افزایش دست کم ۴۰ درصدی پسا در زوایای حمله پایین شده است. به منظور درک بهتر اثرات زبری بر کارایی آئرو دینامیکی مقطع، نسبت ضریب برآ به پسا مقیاس خوبی است. شکل ۱۲ اثر زبری بر نسبت برآ به پسا را در رینولدزهای مختلف نشان می‌دهد. در حالی که این نسبت برای حالت ایرفویل با سطح صاف و صیقلی در رینولدزهای مختلف از ۷۵ تا ۱۳۰ تغییر می‌کند، وجود زبری این نسبت را به ۳۵ در رینولدز $10^6 \times 43$ تا حداکثر ۴۰ در رینولدز $10^6 \times 13$ کاهش داده است. در واقع زبری اثر مطلوب افزایش عدد رینولدز در بهبود کارایی ایرفویل را از بین برده است.

شکل ۱۳ اثر زبری بر روی ضریب ممان پیچشی حول ۲۵٪ وتر را نشان می‌دهد. به طور کلی زبری باعث حرکت مرکز فشار به سمت لبه‌ی فرار مدل می‌شود، اما به سبب افت شدید در توزیع فشار و کاهش

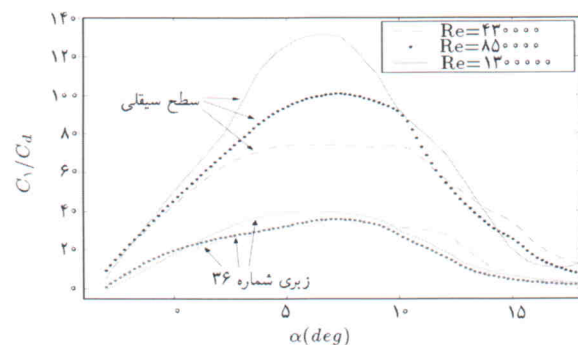


شکل ۱۳. تأثیر زبری بر ضریب ممان پیچشی حول ۲۵٪ وتر در رینولدز $10^6 \times 1/3$.

شکل ۱۱. تأثیر زبری شماره ۳۶ بر روی ضریب پسا در رینولدزهای مختلف.

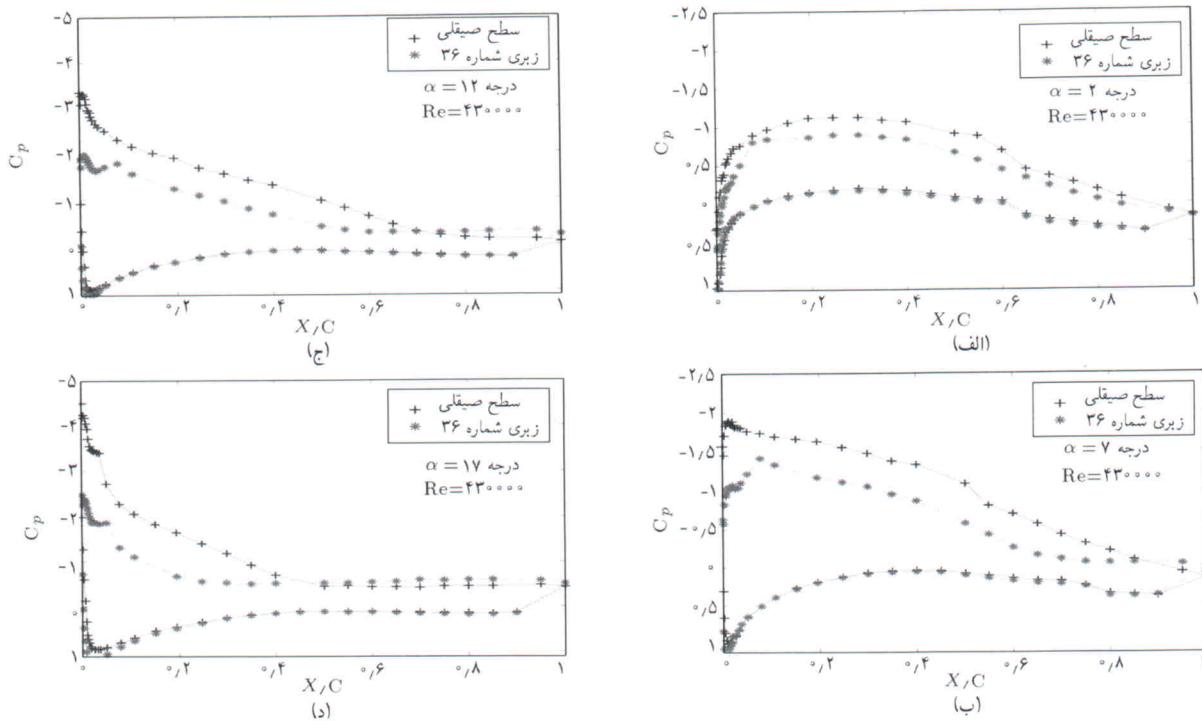
ضریب فشار حول ایرفویل با سطح صاف و صیقلی در زوایای حمله‌ی بالا به راحتی به ۰-۵ می‌رسد اما این مقدار بر اثر زبری به ۰-۳ کاهش یافته است. در زوایای حمله‌ی ۲ و ۷ درجه می‌توان موقعیت نقطه‌ی گذار در سطح بالایی ایرفویل را از نمودارهای توزیع فشار تشخیص داد. زبری باعث از میان رفتن این نقطه شده است. در واقع می‌توان گفت زبری ناحیه‌ی جریان آرام روی مدل را از میان برده و جریان در تمام سطح بالایی مغشوش است. زبری بر توزیع فشار در سطح پایین تأثیری نداشته است.

همان‌طور که ذکر شد یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای پیش‌بینی توان خروجی توربین‌های باد روش BEM است و لازمه‌ی استفاده از این روش دسترسی به جدولی از پارامترهای آئرو دینامیکی مقاطع

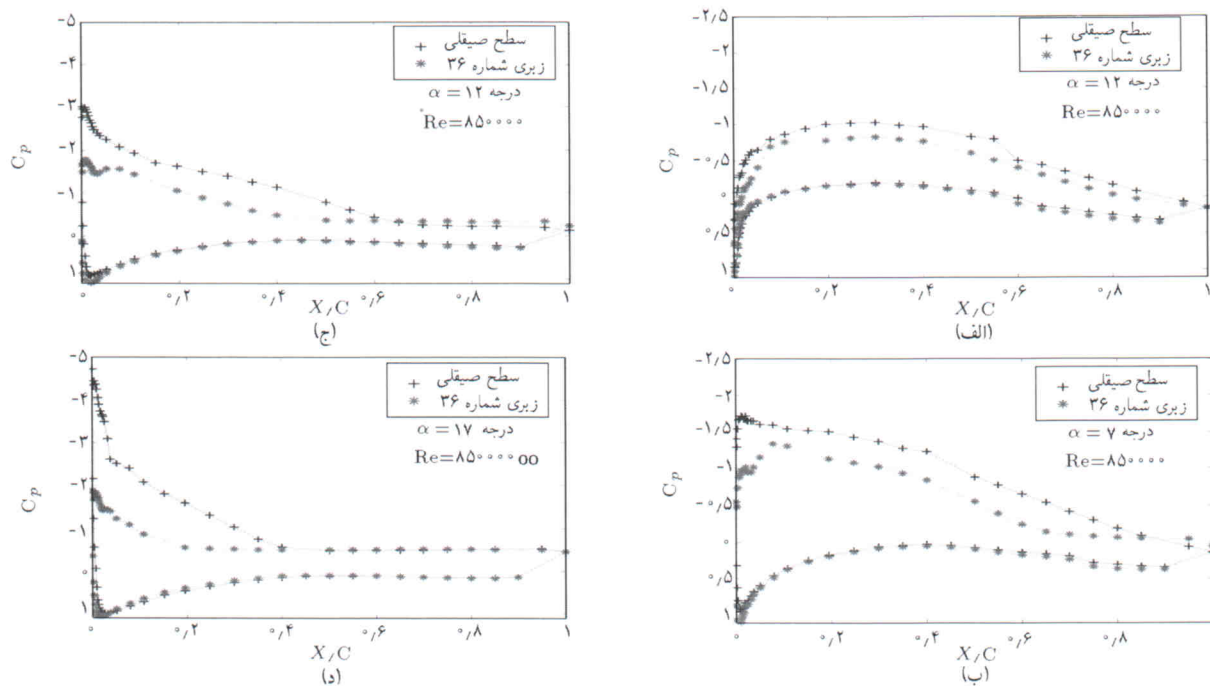


شکل ۱۲. تأثیر زبری بر روی نسبت ضریب برآ به پسا در رینولدزهای مختلف.

رینولدزهای $10^6 \times 85/10^6$ و $10^6 \times 1/3$ به واسطه‌ی زبری از حدود ۶۰٪ به ۸۰٪ در زاویه حمله‌ی ۱۷ درجه افزایش پیدا کرده است.



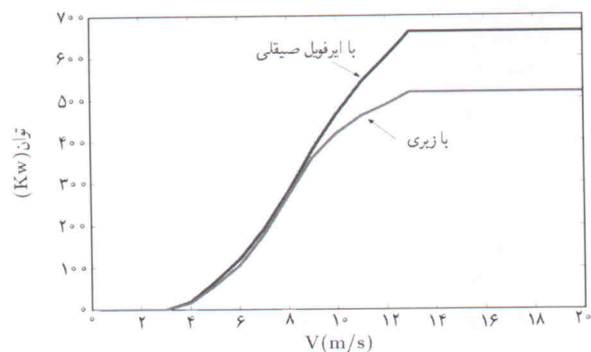
شکل ۱۴. اثر زبری بر توزیع فشار حول مدل در زوایای مختلف حمله و در رینولدز $10^6 \times 43$.



شکل ۱۵. اثر زبری بر توزیع فشار حول مدل در زوایای مختلف حمله و در رینولدز $10^6 \times 85$.

مشهور برای پیش‌بینی توان توربین‌ها است اما به دلیل محدودیت‌های زیاد و نبودن برنامه‌ی مرجع آن مجبور شدیم نرم‌افزاری را از ابتدا براساس روش BEM بنویسیم و به منظور صحت عملکرد آن با نتایج کد Selig مقایسه کنیم. برای مشخص کردن اثر زبری بر کاهش توان، با استفاده

بکار رفته در طول پره است. به همین منظور کدی نوشته می‌شود که با استفاده از این روش کار می‌کند، و با مقایسه‌ی آن با سایر کدهای توربین باد (مانند کد M. Selig) اعتبارسنجی شده است. این نرم‌افزار که در شبکه نیز به صورت فایل اجرایی موجود است، یکی از نرم‌افزارهای

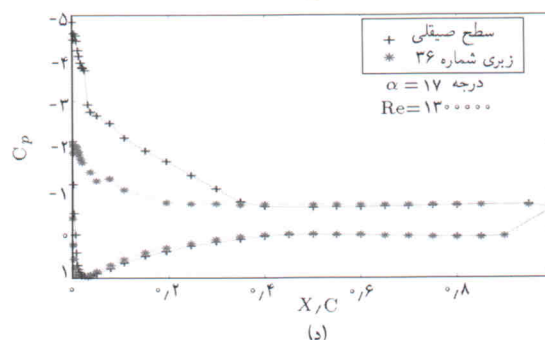
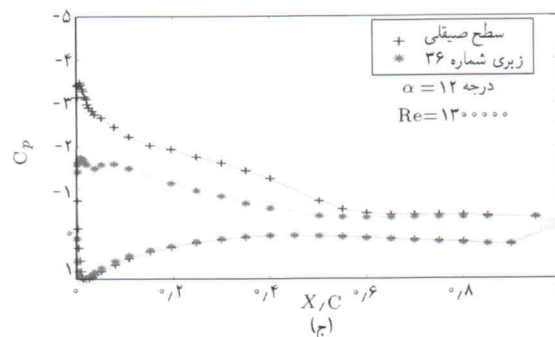
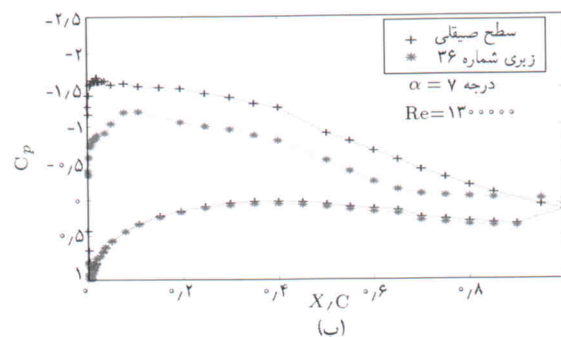
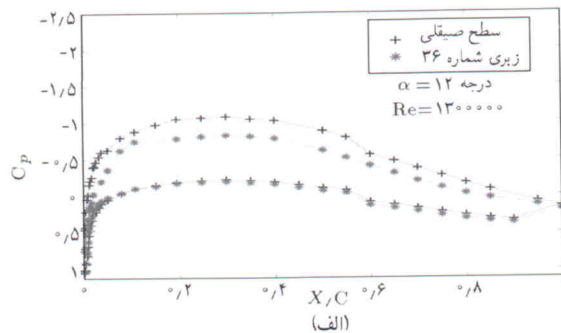


شکل ۱۷. اثر زبری بر توان توربین باد.

از کد نوشته شده‌ی توان توربین برحسب سرعت باد، و با این فرض که پره در تمامی مقاطع آن از همین ایرفویل مورد آزمایش استفاده شده در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، زبری باعث افت قابل ملاحظه‌ی بیشینه‌ی توان به مقدار حداقل ۲۰٪ شده است. با توجه به این اثر، ضرورت تمیز نگه داشتن پره توربین‌های باد که در شرایط کاری در معرض آلودگی قرار می‌گیرند بیش از پیش مشخص می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایشات مختلفی برای اندازه‌گیری توزیع فشار، پروفیل دنباله‌ی جریان، آشکارسازی جریان و بررسی اثرات زبری با توجه به عدد رینولدز و زاویه‌ی حمله روی مقطع پره توربین برق بادی در تونل باد مرکز جهاد کشاورزی شیراز انجام شد. میدان جریان اطراف این مدل با اندازه‌گیری توزیع فشار کل در زوایای حمله‌ی مختلف به وسیله ریک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج با پیش‌بینی صورت گرفته توسط کدهای مهندسی مقایسه شده است. نحوه‌ی تغییرات ضرایب با زاویه‌ی حمله، مؤید تشکیل حباب روی سطح بالا در رینولدزهای پایین است. نتایج به دست آمده حاکی از اثرات نامطلوب زبری بر کارایی آئرو دینامیکی ایرفویل، کاهش ضریب برآ و افزایش پسا است. زبری باعث کاهش شدید بیشینه‌ی ضریب توزیع فشار حول سطح بالایی، از میان رفتن نقطه‌ی گذار و افزایش ناحیه‌ی جدا شده‌ی جریان در زوایای حمله بالا شده است.



شکل ۱۶. اثر زبری بر توزیع فشار حول مدل در زوایای مختلف حمله و در رینولدز $10^6 \times 1/3$.

پانویس

1. leading edge roughness
2. wind blockage
3. traversing system
4. span
5. chord
6. rake

7. hot wire
8. bubble

منابع

1. Wallker, J, "Wind energy technology", John Wiley & Sons, Inc. (July 1997).
2. Dan M. Sommers, James L. Tangler, "Wind-

- Tunnel tests of two airfoils for wind turbines operating at high Reynolds numbers”, Presented at the *ASME Wind Energy Symposium Reno, Nevada*, January 10-13, (2000).
3. J. M. Janiszewska, R. Reuss Ramsay, J. D. Lee, G. M. Gregorek, “Effects of grit roughness and pitch oscillations on the L303 airfoil”, *National Renewable Energy Laboratory* (February 1999).
 4. W.A. Timmer, A.P. Schaffarczyk, “The effect of roughness at high Reynolds numbers on the performance of DU 97-W-300Mod”, Delft University Wind Energy Institute (2004).
 5. Christian Bak, Peter Fuglsang, Niels N. Sorensen, Helge, “Airfoil characteristics for wind turbines”, Riso National Laboratory, Roskilde (March 1999).
 6. J. M. Janiszewska, R. Reuss Ramsay, J. D. Lee, G. M. Gregorek, “Effects of grit roughness and pitch oscillations on the L303 airfoil”, The Ohio State University (1999).
 7. Warren F. Phillips, “Mechanics of flight”, John Wiley & Sons, Inc. (2004).
 8. William H. Rae, Jr. & Alan Pope, “Low-Speed wind tunnel testing”, John Wiley & Sons, Inc (1984).