

مطالعه عددی اثرات انواع فرسایش سطحی در پره توربین بادی، بر عملکرد آیرودینامیکی بر مبنای حل ۳ بعدی

سعید کریمیان علی آبادی، دانشیار - انشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس - گروه هوافضا

سام سهام، دانشجوی دکترا دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس - گروه هوافضا

چکیده

در این پژوهش، افت عملکرد آیرودینامیکی مقطع ایرفویل ناکا ۶۴۶۱۸ که بخشی از پره توربین بادی مبنا می‌باشد، در اثر ۵ نوع فرسایش سطحی متنوع در لبه حمله، با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی ارزیابی شده است. در این رویکرد از الگوهای خرابی متنوع و با ماهیت سه‌بعدی استفاده شده است. شدت فرسایش در دو سطح خفیف و شدید و بر اساس داده‌های تجربی مدل‌سازی شده و عملکرد ایرفویل در بازه زاویه حمله ۵- تا ۲۵ درجه ارزیابی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که فرسایش لبه حمله موجب افزایش محسوس پسا و کاهش بازده آیرودینامیکی می‌شود و شدت خرابی نیز نقش تعیین کننده‌ای دارد. همچنین، مشخص گردید که ترک‌های طولی پره (امتداد عمود بر وتر) بحرانی‌ترین نوع آسیب هستند؛ به طوری که ضریب برآی بیشینه تا ۴۳ درصد و بازدهی آیرودینامیکی بیشینه تا ۵۰ درصد کاهش یافته و ضریب پسا در نقطه بیشینه راندمان آیرودینامیکی بیش از دو برابر می‌شود.

کلمات کلیدی: پره توربین بادی، فرسایش لبه حمله، عملکرد آیرودینامیکی، حل عددی ۳ بعدی، خرابی سطح پره، ضریب پسا

Numerical study of the effects of different erosion types over blade surface of a wind turbine, on the aerodynamic characteristics via 3D simulations

Saeed Karimian Aliabadi^{1*}, Sam Saham²

¹ Associate Professor, Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Ph.D. Candidate, Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Corresponding author: Karimian@modares.ac.ir

Abstract

This study presents a comprehensive numerical investigation into the aerodynamic degradation of the NACA 64618 airfoil, a representative section of modern wind turbine blades, subjected to five distinct types of leading-edge erosion. To realistically capture the random distribution, depth, and width variations of surface defects near the leading edge, fully three-dimensional simulations were performed. The geometric patterns and dimensional ranges of mild and severe erosion were defined based on available experimental observations, ensuring that the modeled damage reflects realistic field conditions. The incompressible flow field was solved using the SST $k-\omega$ turbulence model over a wide range of angles of attack, from -5° to 25° , for three configurations: clean, mildly eroded, and severely eroded airfoils. The results demonstrate that leading-edge erosion significantly increases drag for a given lift level, resulting in a noticeable reduction in aerodynamic efficiency. This performance loss becomes more pronounced at higher angles of attack, where flow separation is more sensitive to surface irregularities. The severity of erosion plays a decisive role, with severe damage causing substantially greater aerodynamic penalties compared to mild erosion. Characteristic curves of lift, drag, and lift-to-drag ratio were generated for all cases, enabling a clear quantitative comparison of the aerodynamic behavior under different erosion scenarios. Among the five erosion types examined, longitudinal cracks (aligned with the blade span and perpendicular to the chord) were found to be the most detrimental. This damage morphology led to reductions of approximately 43% in maximum lift coefficient and 50% in peak aerodynamic efficiency, while increasing drag at the efficiency peak by nearly a factor of four. These findings highlight the critical influence of erosion geometry on airfoil performance and underscore the need for accurate modeling of leading-edge defects in aerodynamic assessments. The results also emphasize the importance of timely inspection and mitigation strategies to preserve the aerodynamic integrity and energy production capability of wind turbine blades.

Keywords: wind turbine blade, aerodynamic characteristics, leading edge erosion, 3D numerical solution, drag coefficient, blade surface damage.

۱- مقدمه

ایرفویل ناکا ۶۴۶۱۸ به طور گسترده‌ای در طراحی پره‌های توربین‌های بادی به کار رفته و عملکرد آیرودینامیکی این مقاطع نقش تعیین‌کننده‌ای در بازده تولید انرژی و قابلیت اطمینان سامانه‌های بادی دارد. یکی از مکانیسم‌های اصلی تخریب این پره‌ها، فرسایش لبه حمله بوده که در اثر برخورد ذرات معلق، قطرات باران، تگرگ و آلودگی‌های جوی رخ می‌دهد؛ این پدیده به تدریج موجب تغییر شکل موضعی هندسه، افزایش زبری سطح و دگرگونی رفتار لایه مرزی می‌گردد. شواهد تجربی نشان می‌دهد فرسایش لبه حمله می‌تواند به طور معناداری تولید سالانه انرژی را کاهش داده و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را افزایش دهد [۱، ۲]. از این رو تشخیص زودهنگام و پایش مستمر این نوع آسیب برای جلوگیری از افت توان و پیشگیری از گسترش خرابی ضروری است.

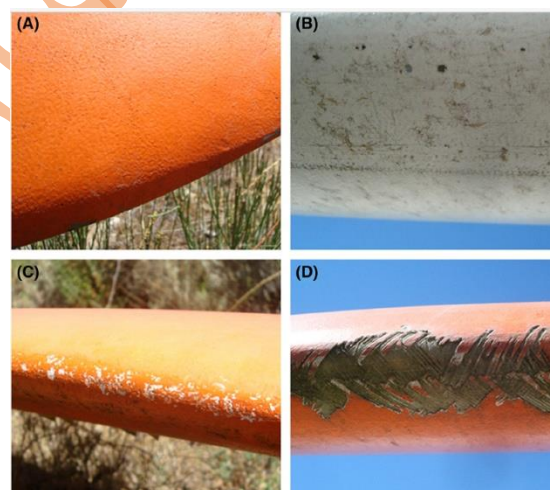


Figure 1. Examples of wind turbine blade erosion: A) roughness formation and erosion, B) pit formation, C) gouging, and D) leading-edge delamination [3]

شکل ۱ - نمونه‌هایی از فرسایش پره توربین بادی. (A) تشکیل زبری و فرسایش، (B) شکل‌گیری حفره، (C) کنده شدگی و (D) پوسته شدن لبه حمله [۳]

پیشرفت‌های اخیر در روش‌های عددی و مدل‌های آشفتگی و ترکیب داده‌های تجربی با شبیه‌سازی‌های عددی می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری اقتصادی و فنی برای بهینه‌سازی برنامه‌های بازرسی، تعمیر و نگهداری مزارع بادی قرار گیرد و از افت تولید و افزایش هزینه‌ها جلوگیری کند [۲].

مطالعات میدانی و آزمایشگاهی، انواع فرسایش لبه حمله معمولاً به سه دسته حفره‌زایی^۱، کنده‌شدگی^۲ و پوسته‌پوسته شدن^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند که هر یک پیامدهای آیرودینامیکی و سازه‌ای متفاوتی به دنبال دارند؛ نمونه‌هایی از پره‌های آسیب دیده با شدت‌های مختلف از خفیف تا شدید در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. تصویر شکل ۲ نیز نمونه‌ای از پره آسیب دیده با ترک طولی را نشان می‌دهد.



Figure 2. Example of a blade damaged by a longitudinal crack [4]

شکل ۲- نمونه پره آسیب دیده با ترک طولی [۴]

در شبیه‌سازی دویعدی پره‌های آسیب دیده، توصیف پارامتری هندسه فرسایش نقش محوری دارد. بر اساس شکل ۳، سه پارامتر کلیدی برای توصیف ناحیه آسیب دیده معرفی می‌شوند که شامل عمق خوردگی (d)، طول خوردگی در سطح بالایی ایرفویل (S_u) و طول خوردگی در سطح پایینی ایرفویل (S_l) است. این پارامترها امکان بازتولید هندسه حذف شده یا تغییر شکل یافته را در مدل‌های عددی فراهم می‌آورند و مبنای تعریف و مقایسه حالات خفیف تا شدید فرسایش را فراهم می‌سازد [۵].

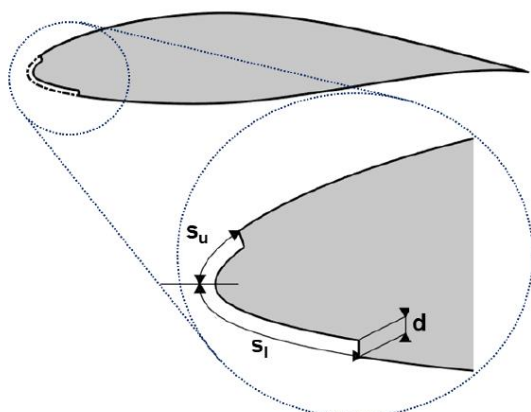


Figure 3. Schematic of leading-edge delamination parameterization for the airfoil [5]

^۳ delamination/peeling

^۱ pitting
^۲ gouging

شکل ۳- شماتیک پارامترسازی پوسته شدن لبه حمله

ایرفویل [۵]

از آنجا که بازتولید دقیق همه اشکال فرسایش در مدل‌های عددی دشوار و پرهزینه است، رویکردهای متداول برای مدل‌سازی این پدیده‌ها متفاوت است. برای نمایش حفره‌ها و کنده‌شدگی‌های پراکنده با ابعاد کوچک معمولاً از افزایش موضعی زبری سطح در ناحیه لبه حمله با روش‌هایی مانند نوارهای زیگزآگ استفاده می‌شود؛ این روش ساده‌سازی، اثرات آشفتگی موضعی را به صورت موثر شبیه‌سازی می‌کند. در مقابل، برای مدل‌سازی پوسته پوسته شدن که با از دست رفتن قابل توجه سطح پره و تغییر هندسه مقطع همراه است، تغییر صریح هندسه ایرفویل در طول وتر اعمال می‌شود تا اثرات آن بر توزیع فشار و جدایی جریان به درستی منعکس گردد [۶].

تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که پارامترهای عمق و طول خوردگی با یکدیگر همبستگی داشته و چندین مدل تخمینی برای تعیین روابط میان آن‌ها ارائه شده است. به عنوان نمونه، گادرن مدل‌هایی پیشنهاد کرده که در آن‌ها طول خوردگی در سطوح بالایی و پایینی تقریباً متقارن فرض شده است [۷]، در حالی که الگوهای به کاررفته توسط سارین و ساپر بر اساس توزیع آماری حفره‌ها و کنده‌شدگی‌ها تدوین شده‌اند [۲].

در مطالعات عددی مربوط به عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل ناکا ۶۴۶۱۸ در اثر فرسایش سطحی، مدل‌سازی دقیق خرابی‌ها با اتکا به فناوری‌های پیشرفته شبکه‌بندی انجام شده و چارچوب‌های محاسباتی توسعه یافته برای بازنمایی هندسه‌های خوردگی و فرسایشی به کار رفته‌اند. افزون بر این، نتایج حاصل از به کارگیری مولدهای تولید گردابه^۴ حاکی از آن است که می‌توان اثرات نامطلوب فرسایش را کاهش داد و تا حدود ۱.۵ درصد از افت تولید انرژی سالانه^۵ را جبران کرد [۸].

در سال‌های اخیر، پتانسیل انرژی باد در نقاط مختلف ایران و جهان نیز مورد ارزیابی قرار گرفته و نمونه‌هایی از توربین‌های بادی با مقیاس‌های مختلف بومی‌سازی شده‌اند؛ که بحث فرسودگی پره از جمله عوامل واقعی و تاثیرگذار بر توان خروجی توربین‌های بادی محسوب می‌شود [۹-۱۲].

همچنین در تحقیقاتی به عملگرهای پلاسما اشاره شده است که کنترل‌کننده جریان بر روی پره‌های توربین‌های بادی بوده که می‌تواند با کاهش واماندگی دینامیکی و حذف گردابه‌ها، ضریب توان کل را تا حدود ۲۰ درصد افزایش دهد. در حوزه پایش سازه‌ای نیز آنالیز مودال بر روی پره‌های کامپوزیتی توربین باد نشان داده است که تغییر در فرکانس‌های طبیعی می‌تواند شاخصی موثر برای شناسایی ترک و تعیین عمق بحرانی آن باشد. علاوه بر این، با شبیه‌سازی سه‌بعدی اثر دمش-مکش بر پره توربین باد محور افقی، گزارش شده که این روش در سرعت‌های بالاتر جریان موجب افزایش قابل توجه بازدهی و تاخیر در وقوع واماندگی می‌شود [۱۳-۱۵]. تمامی این موارد نشان می‌دهد که بهبود یا بررسی عملکرد آیرودینامیکی و توان توربین از موضوعات مهم در این حوزه است.

در سطحی گسترده‌تر، کاهش عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل‌ها بر اثر آسیب یا تغییرات سطحی با روش‌های عددی پیشرفته مستندسازی شده است [۶]. این شواهد دلالت بر ضرورت توجه به جزئیات هندسی دقیق ویژگی‌های فرسایشی و اتخاذ مدل‌سازی مناسب آشفتگی و گذار جریان دارد. به طور خاص برای ایرفویل ناکا ۶۴۶۱۸ تجمع یخ در امتداد لبه حمله به عنوان پدیده‌ای مشابه فرسایش سطحی شناسایی شده است و برآوردهای حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی همراه با مدل‌های چندفازی قطره‌ای پراکنده نشان می‌دهد که افت توان مرتبط می‌تواند در بازه ۸ تا ۲۹ درصد رخ دهد [۱۶].

در بازنمایی هندسه‌های فرسایش، ارزیابی مدل‌های آشفتگی نظیر $k\omega-SST$ و $k\varepsilon-RNG$ در مطالعات آیرودینامیک اهمیت آن‌ها را در شبیه‌سازی گذار جریان و بارهای ناپایدار پیرامون ایرفویل‌ها نشان داده است؛ مدل‌هایی که با شبیه‌سازی فیزیک پیچیده جریان متأثر از فرسایش یا زبری، ظرفیت پیش‌بینی حل عددی را در برآورد افت عملکرد ارتقا می‌دهند [۱۷].

هم‌راستا با این تلاش‌ها، استراتژی‌های عددی نوین و همچنین روش‌های یادگیری ماشین و مدل‌های رگرسیون که یادگیری عمیق را با بهینه‌سازی ترکیب می‌کنند، برای پیش‌بینی سریع و دقیق عملکرد آیرودینامیکی و

^۵ AEP

^۴ Vortex Generators

بهینه‌سازی شکل ایرفویل به کار گرفته شده‌اند. این روش‌ها از نگاشت ضرایب آیرودینامیکی و تسریع ارزیابی‌های عملکرد، به ویژه در مراحل طراحی یا ترمیم ایرفویل‌های فرسوده، قابلیت‌های جدیدی برای تحلیل‌های حساسیت و پارامتری فراهم می‌آورند [۱۸-۲۰]. همچنین نوآوری‌های محاسباتی مبتنی بر شبکه‌های مولد تخصصی شرطی^۶ نشان داده‌اند که پیش‌بینی منحنی‌های ضریب فشار از داده‌های هندسی ایرفویل نسبت به حل عددی سنتی و با حفظ دقت بالا امکان‌پذیر است [۲۱]. در مسیر کاهش افت عملکرد ناشی از فرسایش، پژوهش‌های مرتبط با ابزارهای کنترل جریان غیرفعال مانند گارنی‌فلاپ‌ها و میکروتب‌ها نشان داده‌اند که اصلاحات سطحی کوچک قادر است عملکرد آیرودینامیکی را بهبود بخشد [۲۲].

مجموع این تحقیقات نشان می‌دهد که بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های عددی سه‌بعدی با در نظر گرفتن تنوع هندسی انواع خرابی‌ها در سطح پره توربین بادی، و نیز احتساب شدت و ضعف فرسایش‌ها، ابزاری موثر و معتبر برای پیش‌بینی افت عملکرد آیرودینامیکی مقاطع پره با وجود فرسایش فراهم می‌کند که این داده‌ها می‌تواند به همراه مدل‌سازی صحیح و اتخاذ تکنیک‌های بهینه‌سازی، منجر به عملکرد مطلوب توربین باد شود. مقایسه نتایج با داده‌های تجربی و نتایج تونل باد، قابلیت اتکای این روش‌ها را در بازتولید فیزیک پیچیده جریان ناشی از تخریب سطحی تایید کرده و در کنار راهکارهای طراحی نوآورانه، چشم‌اندازی جامع برای تحلیل و کاهش پیامدهای آیرودینامیکی ناشی از سایش و خرابی سطح در کاربردهای عملی نظیر توربین‌های بادی ارائه می‌دهد [۱۶، ۱۸، ۲۱].

۲- هندسه مبنا

در مطالعه حاضر از مقطع ناکا ۶۴۶۱۸ به عنوان ایرفویل بکار رفته در توربین باد مگاواتی *NREL5MW* استفاده شده است. در ناحیه نوک پره‌های این توربین از این مقطع استفاده شده و از آنجا که خرابی و فرسایش در ناحیه نوک پره‌ها (به دلیل سرعت خطی بیشتر پره در این نواحی) بیشتر رخ می‌دهد لذا این مقطع به عنوان ایرفویل مبنا انتخاب گردیده است. در تحقیقات گذشته نیز مشخص

است که بررسی و شناسایی تاثیر پارامترهایی همچون عمق، تعداد، گستره پخش و فاصله بین خرابی‌ها برای هر یک از انواع فرسایش حفره، کنده شدگی، پوسته پوسته شدن، ترک طولی و عرضی در عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل تاثیرگذار خواهد بود؛ از آنجا که برخی از فرسودگی‌ها ماهیت سه بعدی دارند (مانند حفره‌ها)، لذا در این تحقیق سعی شده است تا میزان تاثیرگذاری هر یک از انواع فرسایش بر ضرایب آیرودینامیکی به صورت سه‌بعدی مورد بررسی عددی قرار گیرد. برای این منظور از دو دسته پارامتر (جدول ۱) مطابق با مطالعات تجربی گذشته در مراجع ۲، ۵ و ۶ برای انواع فرسایش در نظر گرفته شده است. با شبیه‌سازی جریان بر روی هر یک از این ایرفویل‌های آسیب دیده می‌توان اولاً میزان افت ضریب برآ، پسا و نسبت ضریب برآ به پسا را محاسبه نمود؛ ثانیاً نوع فرسایش یا آسیب کلیدی یا موثر بر روی ایرفویل را مشخص کرد.

Table 1. Erosion parameters and their values for mild and severe conditions

جدول ۱- پارامترهای فرسایش و مقدار آن‌ها در حالت خفیف و شدید

	Mild erosion	Severe erosion
Erosion depth/diameter	4 mm	20 mm
Erosion count	10	25
Chord erosion spread	80 mm	160 mm
Distance between erosions	24 mm	12 mm

۳- مدل‌سازی عددی، شبکه محاسباتی و اعتبار سنجی

برای مطالعه حاضر، مقطع ناکا ۶۴۶۱۸ به عنوان مقطع مرجع انتخاب شده و شکل‌های مختلف فرسایش لبه حمله شامل حفره نیم‌دایره‌ای و حفره مربعی، کنده شدگی، ترک های طولی و عرضی با عمق، تعداد و توزیع نرمال در راستای وتر در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که توزیع خرابی‌ها در سطح بالایی در فاصله ۱۰ درصدی از لبه حمله و در سطح پایینی در فاصله ۱۳ درصدی وتر از لبه حمله پخش شده‌اند. ابعاد دامنه حل به صورت سه‌بعدی پیرامون

^۶ CGANs

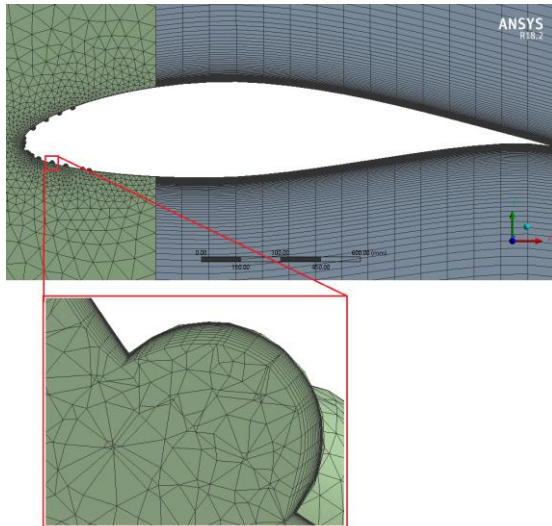


Figure 4. Side view of the computational domain mesh

شکل ۴- نمای جانبی شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

از آنجا که حل عددی نیازمند شبکه بندی دامنه حل است، لذا لازم است تا قبل از انجام فرایند حل و تحلیل نتایج، از تعداد شبکه‌های در نظر گرفته شده اطمینان حاصل شود. لذا فرایند بررسی استقلال از شبکه حل^۷ با معیار تغییرات کمتر از ۲ درصد انجام شده است. معیار سنجش نیز ضریب برآ در زاویه حمله صفر درجه است. از این رو، با توجه به جدول ۲ مقدار ضریب برآ در تعداد شبکه ۸۰۰ هزار معادل ۰.۵۶۵ بوده که اختلاف آن با تعداد شبکه یک میلیون حدود ۰.۴ درصد است (حدود ۲ درصد)؛ از این رو به تعداد ۸۰۰ هزار سلول به عنوان معیار شبکه‌بندی در سایر حل‌ها اکتفا شده است.

Table 2. Mesh independence study for the lift coefficient at zero angle of attack under severe pit-type erosion

جدول ۲- استقلال از شبکه برای پارامتر ضریب برآ در زاویه حمله صفر درجه در حالت فرسایش شدید با حفره

Mesh count	Lift coefficient
200,000	0.460
400,000	0.531
600,000	0.552
800,000	0.565
1,000,000	0.567

ایرفویل با عرض محدود (۲۵۰ میلی‌متر) اما کافی برای لحاظ کردن اثرات سه‌بعدی در نظر گرفته شده است. فاصله لبه فرار تا مرز خروجی ۱۰ برابر اندازه وتر، فاصله لبه حمله تا مرز ورودی و همچنین فاصله سطح ایرفویل از مرزهای بالایی و پایینی حدود ۴ برابر اندازه وتر در نظر گرفته شده است؛ عرض (عمق) دامنه نیز ۰.۲۵ متر لحاظ شده است.

شرایط مرزی برای ورودی جریان (مرز سمت چپ) به صورت سرعت ثابت و با زوایای مورد نظر (۵- الی ۲۵ درجه)، برای خروج جریان (از مرز سمت راست) به صورت فشار اتمسفر و برای مرزهای جانبی به صورت متقارن در نظر گرفته شده است. شبکه‌بندی دامنه محاسباتی و ابعاد آن مشابه شکل ۴ به صورت شبکه ترکیبی (شبکه نامنظم در لبه حمله ایرفویل و منظم در سایر نقاط) تشکیل شده است. در اطراف ایرفویل از شبکه لایه مرزی با تعداد ۱۵ لایه و با هدف دستیابی به مقدار $Y^+ \approx 1$ استفاده شده است. حداقل دقت شبکه بندی (کیفیت متعامد) در کل دامنه نیز در حدود ۳ درصد است. مدل آشفتگی انتخابی نیز با توجه به تحقیقات مشابه گذشته (مانند مرجع ۵) و عملکرد خوب این مدل در شبیه سازی جدایش و رفتار جریان در دور دست انتخاب شده است. معادلات حاکم در حل این مسئله شامل معادله پیوستگی، مومنتوم و معادله میانگین‌گیری شده تنش رینولدز است که به ترتیب در معادلات ۱ تا ۳ نشان داده شده است.

$$\partial \rho / \partial t + \nabla(\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\partial u / \partial t) + \rho(u, \nabla)u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho f_e \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho(\partial U_i) / \partial t + \rho U_j (\partial U_i) / (\partial x_j) = \\ -\partial P / (\partial x_j) + \partial / (\partial x_j) (2\mu S_{ij} - \rho(u_j u_i)) \end{aligned} \quad (3)$$

که در این روابط، u سرعت، p فشار، ρ چگالی، μ لزجت مولکولی و S_{ij} تانسور تغییر شکل المان است. عبارت $\rho u_j u_i = \rho \tau_{ij}$ نیز به عنوان تنش رینولدز شناخته شده و رویکرد اصلی مدل‌های لزج آشفته است.

^۷ Mesh Independence Study

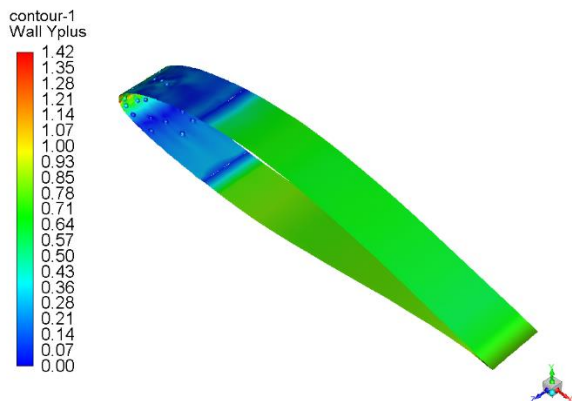
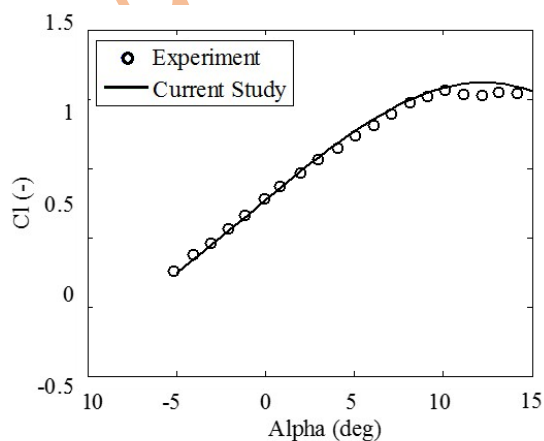


Figure 5. Y^+ contour on the airfoil surface (severe pit-type erosion)

شکل ۵- کانتر Y^+ بر روی سطح ایرفویل (حالت فرسایش شدید با حفره)

معادلات حاکم شامل معادلات ناویر-استوکس تراکم‌ناپذیر به صورت میانگین‌گیری رینولدزی هستند که با روش حجم محدود و حل گر فشار-مبنا روی شبکه ثابت و جریان پایا حل شده است. جهت اطمینان از صحت حل عددی، نتایج ضریب برای یک نمونه ایرفویل آسیب دیده از نوع $DU96-W180$ با تنظیمات حل و شبکه‌بندی مشابه با نمونه تجربی آن در مرجع [۶] در شکل ۶ مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که حل عددی سه‌بعدی مربوطه توانسته است تا با دقت بالایی ضریب برای این ایرفویل را تخمین بزند. تطابق ضریب برآ در زوایای حمله پایین با دقت بالایی انجام گرفته و حداکثر خطای نسبی حل عددی کمتر از ۵ درصد و در محدوده زاویه حمله استال (حدود ۱۲ درجه) است.



علاوه بر استقلال از شبکه، تحلیل عدم قطعیت با اسکیم مرتبه دوم ($p = 2$) و به کمک رابطه ۴ انجام شده است.

$$GCI = \frac{|Cl_1 - Cl_2|}{Cl_1(r^P - 1)} \quad (4)$$

مقدار r نسبت تعداد شبکه ریز به متوسط با توان $1/3$ است. پارامتر Cl_1 و Cl_2 به ترتیب مقدار ضریب برا برای شبکه ریز (0.567) و متوسط (0.565) است. با جایگذاری این مقادیر در فرمول (۴)، مقدار عدم قطعیت در حدود ۲.۲ درصد خواهد بود که برای مطالعه حاضر قابل قبول است. تنظیمات حلگر عددی (فلوئنت) نیز در جدول ۳ قابل مشاهده است.

Table 3. Numerical solver settings (Fluent)

جدول ۳- جدول تنظیمات حلگر عددی (فلوئنت)

Parameter	Value
Wind speed	12 m/s
Airfoil type	Naca 64618
Chord length	2 m
Span length	250 mm
AoA range	-5 to +25 deg
Re	1.6×10^6
Turbulence model	$k - \omega SST$
Solution model	Coupled
Pressure discretization	Standard
Momentum discretization	Second order

پارامتر Y^+ با توجه مدل آشفتگی انتخاب شده در این تحقیق ($k - \omega SST$) حدود ۱ در نظر گرفته شده است. از آنجا که لبه حمله ایرفویل و خرابی‌های موجود در این بخش دارای اهمیت بالایی در این تحقیق بوده، لذا سعی شده تا ارتفاع شبکه در این ناحیه کوچک انتخاب شود تا مقدار Y^+ در محدوده ۱ قرار گیرد. شکل ۵ به خوبی مقدار Y^+ را در اطراف یک نمونه ایرفویل آسیب دیده نشان می‌دهند. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که حداکثر مقدار Y^+ خصوصا در اطراف لبه حمله در محدوده تقریبی ۱ است که انتظار می‌رود رفتار جریان در نزدیکی ایرفویل و خصوصا در نواحی خرابی به درستی شبیه‌سازی شود.

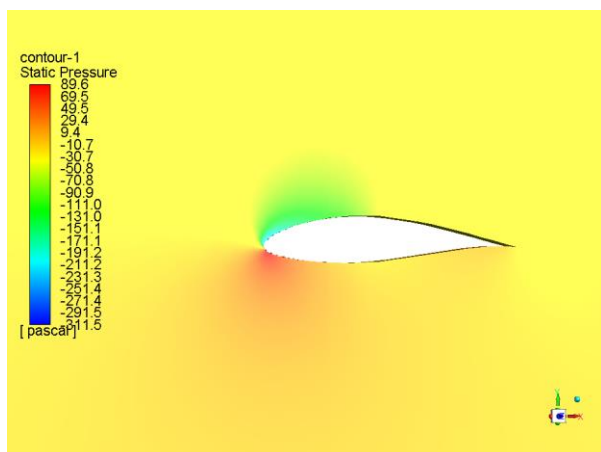


Figure 8. Pressure field around the pit-eroded airfoil at 12° angle of attack

شکل ۸- میدان فشار در اطراف ایرفویل آسیب دیده توسط حفره (زاویه حمله ۱۲ درجه)

در شکل ۹ و ۱۰ عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل آسیب دیده ناشی از ایجاد حفره‌ها ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار بیشینه ضریب برآ در حالت فرسایش خفیف و شدید به ترتیب حدود ۱.۶ و ۱.۴ است، در حالی که برای ایرفویل سالم این مقدار برابر با ۱.۶ می‌باشد. همچنین نسبت ضریب برآ به پسا در شرایط فرسایش خفیف و شدید به ترتیب حدود ۳۹ و ۳۵ بوده که نسبت به مقدار متناظر در ایرفویل سالم (حدود ۴۰) تغییر قابل توجهی نشان نمی‌دهد. این نتایج بیانگر آن است که وجود حفره‌ها، حتی در حالت فرسایش شدید، تنها کاهش محدودی در ظرفیت تولید نیروی برآ ایجاد کرده و نسبت کارایی آیرودینامیکی تقریباً ثابت باقی مانده یا کاهش اندکی دارد. از منظر فیزیکی، این پیامد را می‌توان ناشی از افزایش موضعی اغتشاشات جریان و تغییرات جزئی در توزیع فشار سطحی، بواسطه ایجاد حفره‌ها دانست. در این شرایط، الگوی کلی جریان پیرامون ایرفویل و مکانیزم تولید برآ چندان تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که فرسایش ناشی از حفره‌ها در محدوده و طیف بررسی شده، اثر چشمگیری بر عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل ندارد و ایرفویل همچنان قادر به حفظ بازدهی قابل قبول در شرایط کاری خواهد بود.

Figure 6. Validation of lift coefficient between the present model and experimental data from [6] for the eroded airfoil

شکل ۶- اعتبارسنجی ضریب برآ در مدل حاضر و داده‌های تجربی مستخرج از مرجع [۶] برای ایرفویل آسیب دیده

۴- بحث و نتایج

با مدل‌سازی هندسه، انجام تنظیمات حل شبکه و اجرای شبیه‌سازی سه‌بعدی مشاهده می‌شود که جریان هوا به خوبی وارد حفره‌های خرابی شده و در این محل‌ها جریان گردابی کم سرعتی را ایجاد می‌کند. همین موضوع باعث می‌شود تا ضریب فشار حول ایرفویل تغییر کرده، مقدار پسا افزایش یافته و عملکرد آیرودینامیکی آن نسبت به پره سالم کاهش یابد. میدان فشار و سرعت جریان در اطراف مقطع مورد نظر در زاویه حمله ۱۲ درجه در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. سرعت جریان باد برخوردی به مقطع ۱۲ متر بر ثانیه بوده که این مقدار تا حدود ۲۳ متر بر ثانیه در سطح بالایی ایرفویل و نزدیکی لبه حمله رخ داده است. ناحیه کم سرعت پشت ایرفویل نیز نشان از آغاز جدایش جریان و ایجاد جریان‌های مغشوش است.

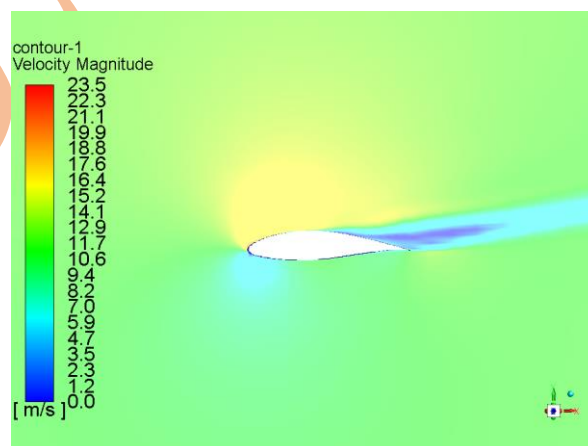


Figure 7. Velocity field around the pit-eroded airfoil at 12° angle of attack

شکل ۷- میدان سرعت در اطراف ایرفویل آسیب دیده توسط حفره (زاویه حمله ۱۲ درجه)

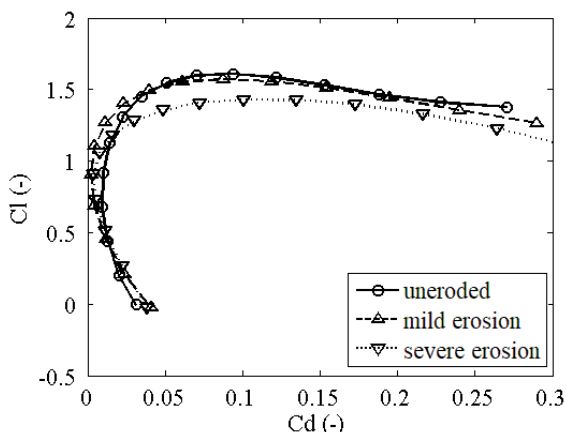


Figure 11. Comparison of lift coefficient versus drag coefficient for pit-type erosion

شکل ۱۱- مقایسه ضریب برآ بر حسب ضریب پسا برای فرسایش از نوع حفره

شکل ۱۲ و ۱۳ عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل آسیب دیده ناشی از کنده شدگی سطحی را نشان می‌دهند. در حالت ایرفویل سالم بیشینه ضریب برآ برابر با ۱.۶ بوده و بازدهی آیرودینامیکی آن (نسبت برآ به پسا) حدود ۴۰ ثبت شده است. در مقابل، برای حالت آسیب دیده، مقدار بیشینه ضریب برآ به ترتیب در حالت فرسایش خفیف و شدید تا حدود ۱.۴ و ۱.۳ کاهش یافته است که نشان دهنده افت محسوس ظرفیت تولید نیروی برآ می‌باشد. علاوه بر کاهش مقدار بیشینه، شیب منحنی برآ نیز نسبت به حالت سالم کاهش نسبی داشته که بیانگر افت تدریجی توانایی ایرفویل در تولید نیروی برآ با افزایش زاویه حمله است. در نمودار نسبت برآ به پسا نیز بیشینه بازدهی آیرودینامیکی در حالت فرسایش خفیف و شدید به ترتیب ۳۶ و ۳۰ بوده که نسبت به مقدار ۴۰ در ایرفویل سالم کاهش قابل توجهی دارد. نکته دیگر آن است که در حالت فرسایش شدید، نقطه بیشینه بازدهی حدود ۲ درجه زودتر از حالت پره سالم رخ داده و این امر نشان دهنده تغییر در رفتار جریان و جابه‌جایی نقطه بهینه عملکرد است. از دیدگاه فیزیکی، کنده‌شدگی سطحی موجب افزایش زبری و آشفتگی موضعی جریان می‌شود که در نهایت به کاهش راندمان کلی ایرفویل منجر می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برخلاف فرسایش ناشی از حفره‌ها که اثر محدودی بر عملکرد داشت، کنده‌شدگی سطحی تاثیر به نسبت بیشتری بر کاهش ضریب برآ و بازدهی آیرودینامیکی دارد و می‌تواند عملکرد توربین باد را در شرایط کاری واقعی تحت تاثیر قرار دهد.

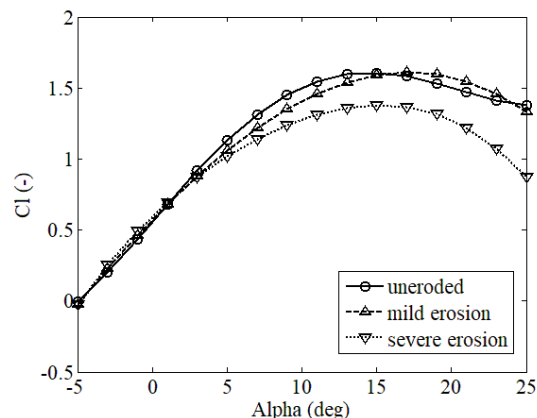


Figure 9. Comparison of lift coefficient for pit-type erosion

شکل ۹- مقایسه ضریب برآ برای فرسایش از نوع حفره

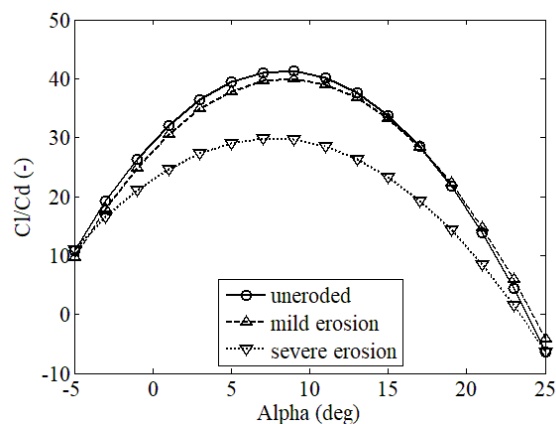


Figure 10. Comparison of aerodynamic efficiency for pit-type erosion

شکل ۱۰- مقایسه بازدهی آیرودینامیکی برای فرسایش از نوع حفره

شکل ۱۱ نیز نشان دهنده مقدار ضریب برآ بر حسب ضریب پسای ایرفویل آسیب دیده است. به کمک این نمودار می‌توان پسای ایجاد شده برای تولید مقادیر مختلف برآ را مشاهده و تحلیل کرد. با ارزیابی این نمودار مشاهده می‌شود که در فرسایش شدید از نوع حفره، در مقدار ضریب برآی یکسان (مثلاً ۱.۳۵) مقدار ضریب پسا معادل ۰.۱ بوده، درحالی که این مقدار برای پره سالم و پره با شرایط فرسایش خفیف در حدود ۰.۰۴ است.

هم خواهد شد، که این موضوع می‌تواند ناشی از آشفته‌گی و جدایش جریان باشد.

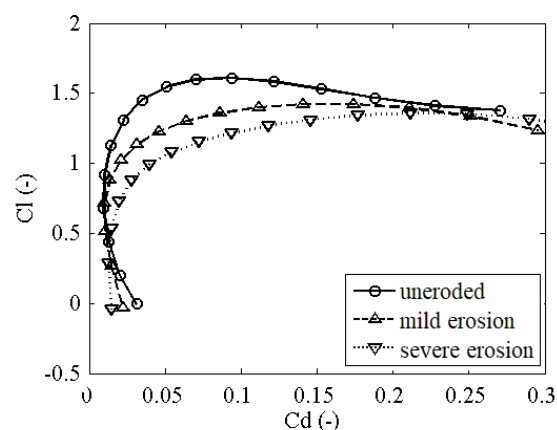


Figure 14. Comparison of lift coefficient versus drag coefficient for gouge-type erosion

شکل ۱۴- مقایسه ضریب برآ بر حسب ضریب پسا برای فرسایش از نوع کنده شدگی

شکل ۱۵ و ۱۶ عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل تحت آسیب ناشی از پوسته پوسته شدن سطحی را نمایش می‌دهند. در شرایط آسیب دیده، بیشینه ضریب برآ در حالت‌های فرسایش خفیف و شدید تقریباً یکسان بوده و تا حدود ۱.۳ کاهش یافته است که نشان دهنده افت محسوس توانایی ایرفویل در تولید نیروی برآ می‌باشد. علاوه بر این، شیب منحنی برآ نیز نسبت به حالت سالم کاهش قابل توجهی داشته که بیانگر کاهش تدریجی ظرفیت تولید نیروی برآ با افزایش زاویه حمله است. در نمودار بازدهی آیرودینامیکی، بیشینه این مقدار در حالت فرسایش خفیف برابر با ۳۰ و در حالت شدید در زاویه حمله ۷ درجه برابر با ۲۴ ثبت شده است. این مقادیر نسبت به ایرفویل سالم کاهش ۲۸ و ۴۲ درصدی را نشان می‌دهند که بیانگر افت جدی بازدهی آیرودینامیکی در اثر پوسته پوسته شدن سطحی است. کاهش چشمگیر نسبت ضریب برآ به پسا، با وجود تغییرات اندک ضریب برآ در حالت‌های وجود فرسایش خفیف و شدید، نشان دهنده افزایش قابل توجه ضریب پسا می‌باشد؛ بدین معنا که فرسایش از نوع پوسته پوسته شدن سطحی در شرایط شدید می‌تواند ضریب پسا را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این نوع آسیب، برخلاف فرسایش‌های قبلی، تاثیر چشمگیرتری بر کاهش ضریب برآ و بازدهی آیرودینامیکی

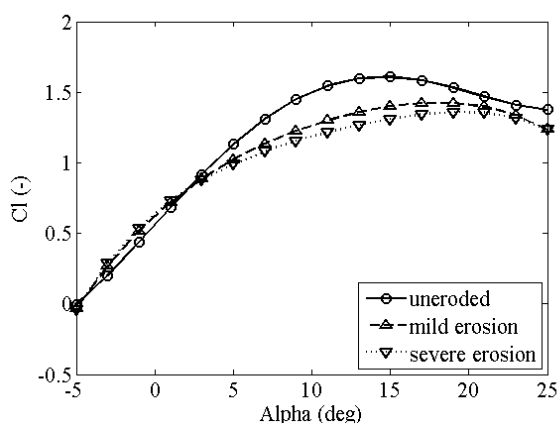


Figure 12. Comparison of lift coefficient for gouge-type erosion

شکل ۱۲- مقایسه ضریب برآ برای فرسایش از نوع کنده شدگی

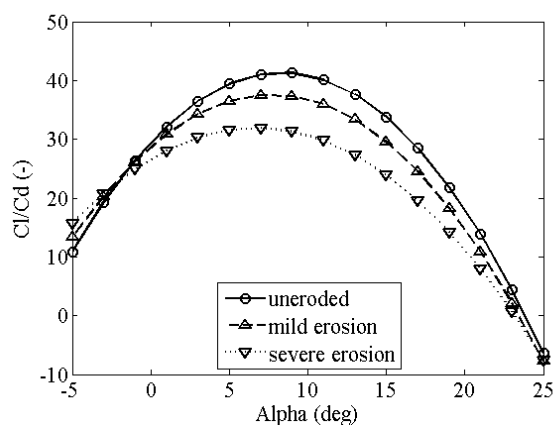


Figure 13. Comparison of aerodynamic efficiency for gouge-type erosion

شکل ۱۳- مقایسه بازدهی آیرودینامیکی برای فرسایش از نوع کنده شدگی

شکل ۱۴ نشان دهنده مقدار ضریب برآ بر حسب ضریب پسا در ایرفویل آسیب دیده با کنده شدگی است. مقدار پسای تولید به ازای برآی یکسان در این نوع فرسایش به گونه‌ای است که، در بیشینه ضریب برآی ایرفویل سالم (در حدود ۱.۶) مقدار ضریب پسا ۰.۰۷ است. این درحالی است ایرفویل آسیب دیده به این مقدار برآ نرسیده، و در ضریب پسای مشابه، به ترتیب مقدار ۱.۳ و ۱.۱ را برای ضریب برآ در حالت فرسایش خفیف و شدید ثبت کرده است. از طرفی، مقدار ضریب پسای معادل ۰.۲۵ مشاهده می‌شود که مقدار ضریب برآ برای مقاطع سالم و آسیب دیده بسیار نزدیک به

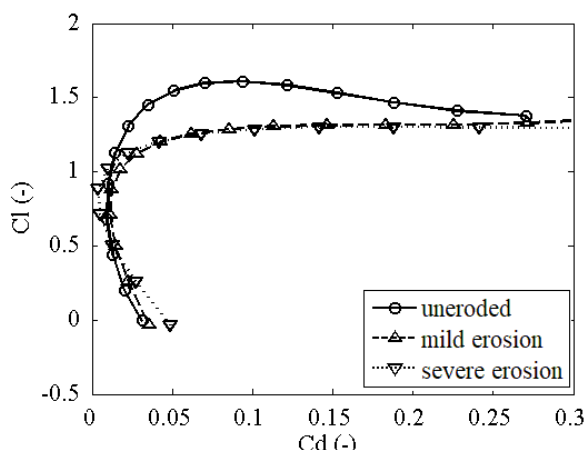


Figure 17. Comparison of lift coefficient versus drag coefficient for delamination-type erosion

شکل ۱۷- مقایسه ضریب برآ بر حسب ضریب پسا برای فرسایش از نوع پوسته پوسته

شکل ۱۸ و ۱۹ نیز عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل تحت آسیب ترک عرضی (در راستای وتر) را نشان می‌دهند. در این حالت بیشینه ضریب برآ در حالت ترک خفیف و شدید به ترتیب تا حدود ۱.۴ و ۱.۳ کاهش یافته است که بیانگر افت محسوس توانایی ایرفویل در تولید نیروی برآ می‌باشد. علاوه بر کاهش بیشینه این مقدار، شیب منحنی برآ نیز نسبت به حالت سالم کاهش قابل توجهی داشته و نشان دهنده کاهش تدریجی ظرفیت تولید نیروی برآ با افزایش زاویه حمله است. در نمودار بازدهی آیرودینامیکی، بیشینه این مقدار در حالت ترک خفیف حدود ۳۷ و در حالت ترک شدید در زاویه حمله ۶ درجه برابر با ۲۸ گزارش شده است. این مقدار در حالت فرسایش شدید نسبت به ایرفویل سالم کاهش حدود ۳۳ درصدی را نشان می‌دهد که حاکی از افت چشمگیر نسبت ضریب برآ به پسا است. بنابراین ترک عرضی نیز از جمله آسیب‌های سطحی مهم بر روی پره‌های توربین بوده که نیاز به توجه و ترمیم دارد.

داشته و می‌تواند عملکرد کلی توربین را به طور جدی تحت تاثیر قرار دهد. لذا جلوگیری از ایجاد این نوع خرابی و یا انجام فرایندهای تعمیراتی برای رفع آن توصیه می‌شود.

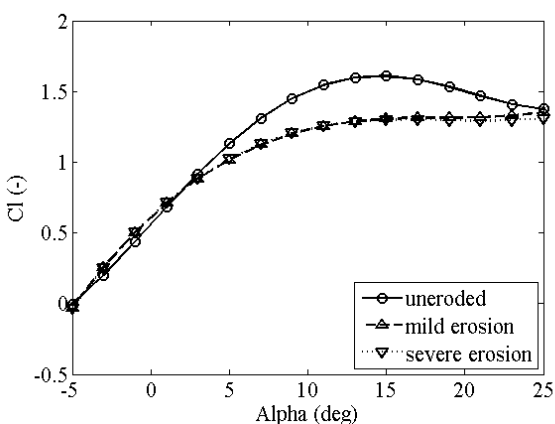


Figure 15. Comparison of lift coefficient for delamination-type erosion

شکل ۱۵- مقایسه ضریب برآ برای فرسایش از نوع پوسته پوسته

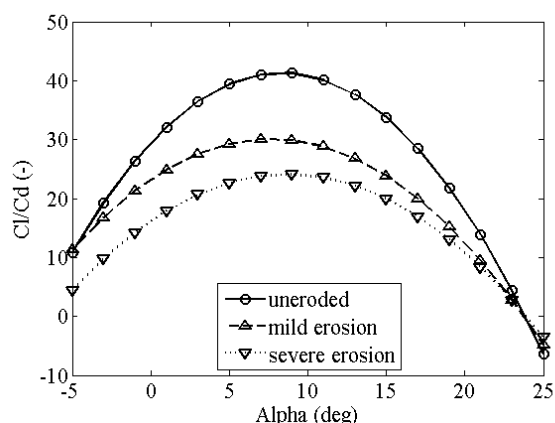


Figure 16. Comparison of aerodynamic efficiency for delamination-type erosion

شکل ۱۶- مقایسه بازدهی آیرودینامیکی برای فرسایش از نوع پوسته پوسته

شکل ۱۷ نشان دهنده مقدار ضریب برآ بر حسب ضریب پسا در ایرفویل آسیب دیده با پوسته پوسته شدن است. مقدار پسای تولیدی به ازای برآی یکسان در این نوع فرسایش در خرابی شدید و خفیف تقریباً یکسان است؛ فقط در ضریب برآی صفر، مقدار ضریب پسا در فرسایش شدید اندکی بیشتر از خرابی خفیف و ایرفویل سالم می‌باشد. مقدار ضریب پسای ۰.۰۷ نیز، مقطع آسیب دیده دارای ضریب برآی ۱.۲ است.

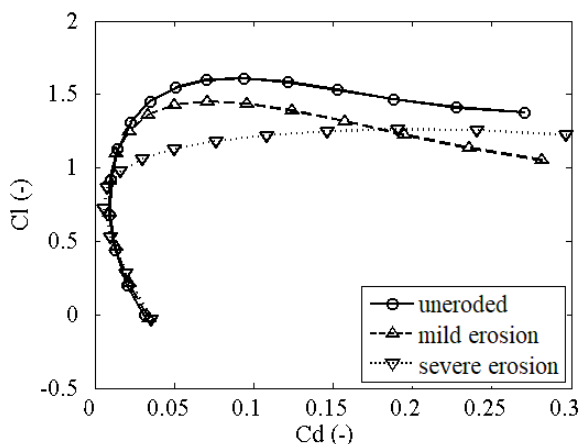


Figure 20. Comparison of lift coefficient versus drag coefficient for transverse-crack erosion

شکل ۲۰- مقایسه ضریب برآ بر حسب ضریب پسا برای فرسایش از نوع ترک در راستای وتر

شکل ۲۱ و ۲۲ نیز عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل تحت آسیب ناشی از ترک طولی در راستای محور Z (در راستای طول پره) را نشان می‌دهند. در این حالت بیشینه ضریب برآ در حالت ترک خفیف و شدید به ترتیب تا حدود ۱.۳ و ۰.۹ کاهش یافته است که نشان دهنده افت بسیار محسوس در تولید نیروی برآ می‌باشد که نسبت به تمامی حالت های قبلی مقدار بیشتری محسوب می‌شود. کاهش شدید ضریب برآ در حالت ترک طولی بیانگر آن است که این نوع آسیب می‌تواند به طور جدی مکانیزم تولید برآ را مختل کرده و از طرف دیگر منجر به افزایش قابل توجه پسا شود. علاوه بر این، در نمودار نسبت برآ به پسا، بیشینه بازدهی آیرودینامیکی در حالت ترک خفیف حدود ۳۰ و در حالت ترک شدید در زاویه حمله ۶ درجه برابر با ۲۱ گزارش شده است. این مقادیر نسبت به ایرفویل سالم کاهش حدود ۲۵ درصدی در حالت خفیف و نزدیک به ۵۰ درصدی در حالت شدید را نشان می‌دهند که بیانگر افت بسیار زیاد بازدهی آیرودینامیکی در اثر ترک طولی است. همچنین جابه‌جایی نقطه بیشینه بازدهی به زاویه حمله پایین‌تر، حاکی از تغییر در رفتار جریان، افزایش آشفتگی موضعی و تسریع در وقوع واماندگی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ترک طولی، نسبت به سایر انواع فرسایش سطحی، تاثیر بیشتری بر کاهش ضریب برآ، افزایش پسا و کاهش بازدهی دارد و می‌تواند عملکرد کلی توربین را بیش از سایر موارد، تحت تاثیر قرار دهد. این امر علاوه بر افت انرژی استحصال شده،

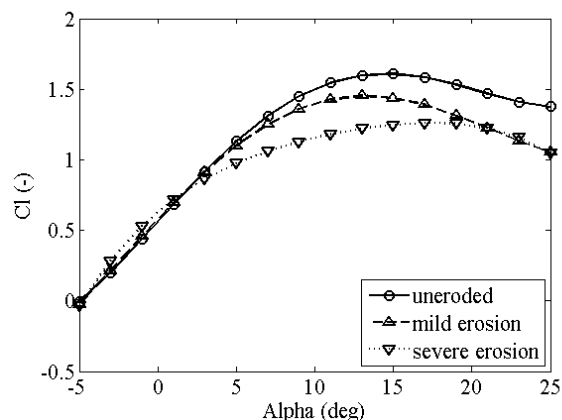


Figure 18. Comparison of lift coefficient for transverse-crack erosion

شکل ۱۸- مقایسه ضریب برآ برای فرسایش از نوع ترک در راستای وتر

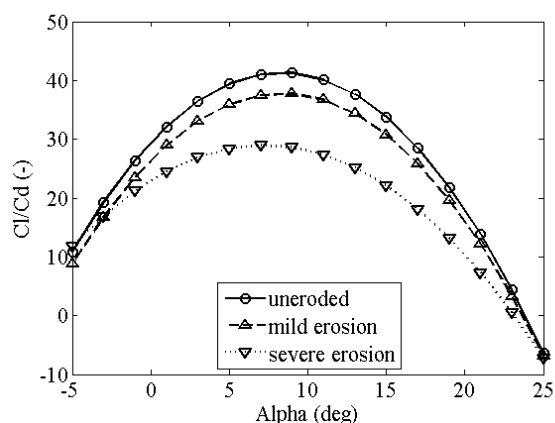


Figure 19. Comparison of aerodynamic efficiency for transverse-crack erosion

شکل ۱۹- مقایسه بازدهی آیرودینامیکی برای فرسایش از نوع ترک در راستای وتر

شکل ۲۰ هم نشان دهنده نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در ایرفویل آسیب دیده با ترک در راستای وتر است. مقدار برآی حاصله نسبت به ضریب پسای آن در مقطع آسیب دیده به وضوح کاهش یافته، و این موضوع در فرسایش خفیف اغلب در ضریب پسای بالا (متناظر با زاویه حمله بالا) رخ داده است؛ در حالیکه در فرسایش شدید، مقدار برآی متناظر با ضریب پسای یکسان بسیار کمتر از مقطع سالم است.

افزایش یافته است. از این رو، این نوع فرسایش پره نیازمند توجه جدی و اقدامات ترمیمی لازم است.

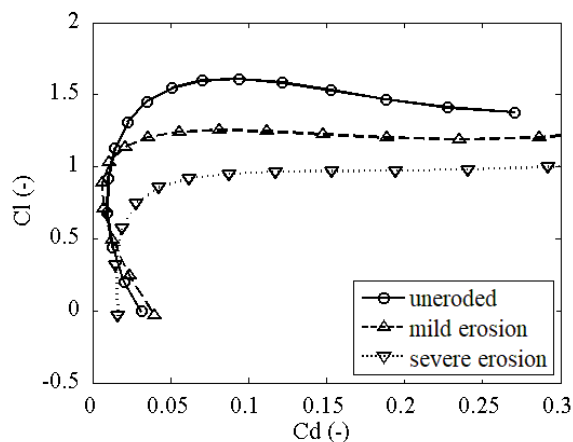


Figure 23. Comparison of lift coefficient versus drag coefficient for longitudinal-crack erosion

شکل ۲۳- مقایسه ضریب برآ بر حسب ضریب پسا برای فرسایش از نوع ترک طولی

در جدول ۴ مقایسه‌ای جامع از انواع فرسایش سطحی ایرفویل در حالت‌های خفیف و شدید ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ترک‌های طولی بیشترین تاثیر منفی را بر عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل دارند. در شرایط ترک طولی، افت ضریب برآ بین ۱۸ تا ۳۷ درصد مشاهده شده که نشان دهنده کاهش محسوس ظرفیت تولید نیروی برآ می‌باشد. همچنین کاهش بازدهی آیرودینامیکی بین ۳۰ تا ۵۰ درصد بوده که نسبت به سایر انواع خرابی‌ها بحرانی‌تر ارزیابی می‌شود. این افت شدید بازدهی بیانگر ایجاد اغتشاشات در راستای افزایش نیروی پسا و کاهش برا بوده که در نهایت ضریب فشار در اطراف ایرفویل را تغییر داده و عملکرد آیرودینامیکی را کاهش داده است. بنابراین، نتایج جدول ۴ به‌وضوح نشان می‌دهد که ترک‌های طولی نسبت به سایر انواع فرسایش نظیر پوسته شدن یا حفره‌ای شدن سطح ایرفویل، اثرات مخرب‌تری بر عملکرد آیرودینامیکی دارند و می‌توانند به‌عنوان بحرانی‌ترین نوع آسیب در ارزیابی سلامت پره‌های توربین بادی شناخته شوند.

Table 4. Reduction in aerodynamic coefficients of the eroded airfoil relative to the clean airfoil

جدول ۴- مقدار کاهش ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل آسیب دیده نسبت به ایرفویل سالم

موجب از دور خارج شدن توربین در آینده نه چندان دور خواهد شد.

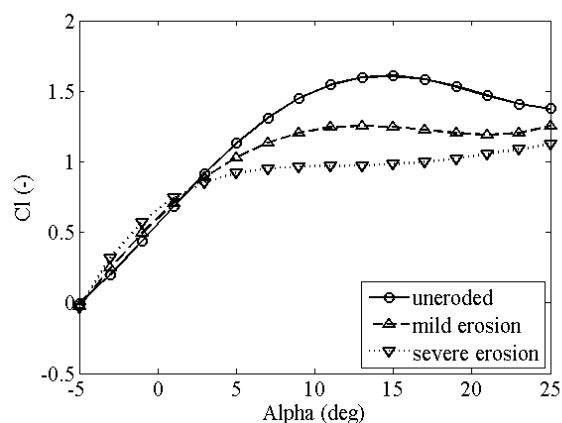


Figure 21. Comparison of lift coefficient for longitudinal-crack erosion

شکل ۲۱- مقایسه ضریب برآ برای فرسایش از نوع ترک طولی

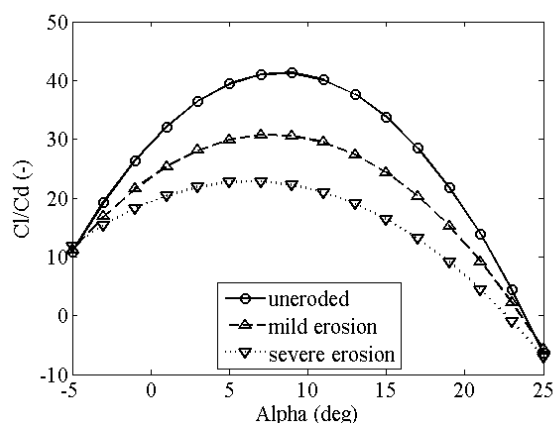


Figure 22. Comparison of aerodynamic efficiency for longitudinal-crack erosion

شکل ۲۲- مقایسه بازدهی آیرودینامیکی برای فرسایش از نوع ترک طولی

شکل ۲۳ نشان دهنده مقدار ضریب برآ بر حسب ضریب پسا در مقطع آسیب دیده با ترک طولی (در راستای طول پره) است. مقدار برای تولید شده در این نوع خرابی، هم در حالت فرسایش خفیف و هم فرسایش شدید به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. به عنوان مثال، در ضریب پسای ۰.۰۷ (معادل بیشترین ضریب برآ در ایرفویل سالم)، مقدار ضریب برآ در مقطع با فرسایش خفیف حدود ۱.۲ و برای فرسایش شدید در محدوده ۰.۸ است. این موضوع نشان می‌دهد که در این نوع خرابی سطحی پره، مقدار پسای ایجاد شده به ازای برای لازم به طور چشمگیری

نخستین بار امکان رتبه‌بندی کمی آسیب‌ها و شناسایی بحرانی‌ترین الگوی فرسایش را فراهم کرده است.

این یافته‌ها می‌توانند مبنایی برای توسعه روش‌های پایش سلامت پره‌ها، تشخیص زودهنگام خرابی و تصمیم‌گیری مبتنی بر افت عملکرد در برنامه‌های تعمیر و نگهداری باشند. علاوه بر این، ترکیب نتایج سه‌بعدی حاضر با مدل‌سازی زبری سطحی، یا ادغام آن‌ها در چارچوب‌های یادگیری ماشین و مدل‌های پیش‌بینی توان توربین، می‌تواند مسیر جدیدی برای افزایش دقت پیش‌بینی افت عملکرد و بهینه‌سازی راهبردهای نگهداری در مزارع بادی فراهم سازد. چنین رویکردی در نهایت به افزایش قابلیت اطمینان، کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش طول عمر سازه‌های توربین بادی منجر خواهد شد.

Erosion type	Mild erosion		Severe erosion	
	Cl _{max}	(Cl/Cd) _{max}	Cl _{max}	(Cl/Cd) _{max}
pit	insignificant	10% decrease	13% decrease	16% decrease
Gouge	13% decrease	14% decrease	18% decrease	28% decrease
Delamination	18% decrease	28% decrease	20% decrease	42% decrease
Transverse crack	13% decrease	14% decrease	18% decrease	33% decrease
Longitudinal crack	18% decrease	28% decrease	43% decrease	50% decrease

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک چارچوب عددی سه‌بعدی برای تحلیل اثرات پنج الگوی متفاوت فرسایش سطحی بر عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل ناکا ۶۴۶۱۸ ارائه شد؛ رویکردی که نسبت به مطالعات پیشین، که عمدتاً محدود به یک یا دو نوع خرابی و در قالب تحلیل‌های دوبعدی بوده‌اند، گستره وسیع‌تری از آسیب‌ها را با دقت هندسی بالاتر پوشش می‌دهد. استفاده از حل سه‌بعدی مبتنی بر مدل آشفتگی $k\omega-SST$ امکان بررسی دقیق رفتار لایه مرزی، الگوهای جدایش و تغییرات موضعی میدان جریان را با هزینه محاسباتی معقول فراهم کرد و نشان داد که اثرات فرسایش، ماهیتی کاملاً سه‌بعدی و وابسته به شکل و عمق خرابی دارند.

نتایج این مطالعه به‌صورت نوآورانه نشان داد که شدت اثرگذاری انواع فرسایش یکسان نیست و ترک‌های طولی (در امتداد راستای پره) بحرانی‌ترین نوع خرابی محسوب می‌شوند. در حالت ترک طولی شدید، ضریب پسا در زاویه حمله متناظر با بیشینه بازدهی تقریباً دو برابر شده و ضریب برای بیشینه تا حدود ۴۳ درصد کاهش می‌یابد؛ موضوعی که در نهایت افتی نزدیک به ۵۰ درصد در بازده آیرودینامیکی ایجاد می‌کند. در مقابل، فرسایش‌های حفره‌ای کمترین تأثیر را داشته و تغییرات محدودتری در ضرایب آیرودینامیکی ایجاد می‌کنند. این مقایسه سیستماتیک میان پنج الگوی خرابی مختلف، برای

مراجع

1. Kollar, L.E. and Mishra, R., 2019. Inverse design of wind turbine blade sections for operation under icing conditions. *Energy Conversion and Management*, 180, pp.844–858.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.015>
2. Sareen, A, Sapre, C.A. and Selig, M.S., 2014. Effects of leading-edge erosion on wind turbine blade performance. *Wind Energy*, 17(10), pp.1531–1542.
<https://doi.org/10.1002/we.1649>
3. Cappugi, L, Bortolotti, P, Croce, A. and Bottasso, C.L., 2021. Machine learning-enabled prediction of wind turbine energy yield losses due to general blade leading edge erosion. *Energy Conversion and Management*, 245, pp.114567.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114567>
4. Mishnaevsky Jr, L, Thomsen, K, Sørensen, B.F. and Bech, J.I., 2021. Leading edge erosion of wind turbine blades understanding prevention and protection. *Renewable Energy*, 169, pp.953–969.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.044>
5. Campobasso, M.S, Cavazzini, A. and Minisci, E., 2020. Rapid estimate of wind

<https://doi.org/10.22044/jsfm.2022.11306.3486>

13. Sharifi, S, Rashid, Gh. and Salami Zadeh, M., 2025. Application of Modal Analysis for Health Monitoring of Wind Turbine Blade. *Sharif Journal of Mechanical Engineering (SJME)*. [in Persian]. <https://doi.org/10.24200/j40.2025.67449.1745>
14. Karimian Aliabadi, S. and Gaskari Nejad, S.J., 2025. Numerical study of the effect of flow control using plasma actuator on the aerodynamic performance of a VAWT. *Sharif Journal of Mechanical Engineering (SJME)*. 41(2), pp. 63-75 [in Persian]. <https://doi.org/10.24200/j40.2025.67068.1739>
15. Masoudi, F. and Karimian Aliabadi, S., 2025. Numerical study of the effect of suction–blowing flow control actuators on the aerodynamic coefficients of a kilowatt-scale horizontal-axis wind turbine blade. *Sharif Journal of Mechanical Engineering (SJME)*. 41(1), pp.125–135. [in Persian]. <https://doi.org/10.24200/j40.2025.65443.1722>
16. Han, W, Kim, J. and Kim, B., 2018. Study on correlation between wind turbine performance and ice accretion along a blade tip airfoil using CFD. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10(2). <https://doi.org/10.1063/1.5012802>
17. Rogowski, K., 2018. Numerical studies on two turbulence models and a laminar model for aerodynamics of a vertical-axis wind turbine. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(5), pp.2079–2088. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0417-0>
18. Liu, R.-L, Zhang, Y, Wang, L. and Li, X., 2022. Prediction and optimization of airfoil aerodynamic performance using deep neural network coupled Bayesian method. *Physics of Fluids*, 34(11). <https://doi.org/10.1063/5.0122595>
19. Andrés-Pérez, E. and Paulete-Periáñez, C., 2021. On the application of surrogate regression models for aerodynamic coefficient prediction. *Complex and Intelligent Systems*, 7(4), pp.1991–2021. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00307-y>
20. Zhang, T.-t, Li, Y, Wang, X. and Chen, J., 2016. A study of airfoil parameterization modeling and optimization based on the

turbine energy loss due to blade leading edge delamination using artificial neural networks. *Journal of Turbomachinery*, 142(7), pp.071002. <https://doi.org/10.1115/1.4047186>

6. Campobasso, M.S, Minisci, E. and Bianchi, S., 2022. Experimentally validated three-dimensional computational aerodynamics of wind turbine blade sections featuring leading edge erosion cavities. *Wind Energy*, 25(1), pp.168–189. <https://doi.org/10.1002/we.2666>
7. Gaudern, N., 2014. A practical study of the aerodynamic impact of wind turbine blade leading edge erosion. *Journal of Physics: Conference Series*, 524, pp.012031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012031>
8. Bretos-Arguiñena, D. and Méndez-López, B., 2023. Aerodynamic simulation of rough and eroded blades AEP effect and mitigation using low drag vortex generators. *Wind Energy Science Discussions*, pp.1–25. <https://doi.org/10.5194/wes-2023-8>
9. Karimian, S. and Saham, S.S., 2022. Wind energy potential evaluation and customizing a H-rotor turbine based on Tehran Zahedan and Manjil climate. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 12(5), pp.267–281. <https://doi.org/10.22044/jsfm.2022.11306.3486>
10. Saham, S. and Karimian Aliabadi, S., 2024. A comparative study of the aerodynamic performance and economic viability of H-shape and V-shape wind turbines in the climate of Zahedan city. *Sharif Journal of Mechanical Engineering (SJME)*, 40(1), pp.111–118. <https://doi.org/10.24200/j40.2023.62309.1680>
11. Saham, S.S. and Karimian Aliabadi, S., 2022. Localization and aerodynamic improvement of an urban-scale vertical axis wind turbine according to the Sistan climate. *Journal of Aerospace Science and Technology*, 15(2), pp.135–145. <https://doi.org/10.22034/jast.2022.315321.1106>
12. Karimian, S. and Sam, S., 2022. Wind energy potential evaluation and customizing a vertical axis wind turbine based on Iran cities climate. *Mechanics of Structures and Fluids*, 12(5), pp.267–281. [in Persian].

Learning Systems, 34(7), pp.3538–3552.
<https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3111911>

22. Fernandez-Gamiz, U, Gomez-Mármol, M. and Chacón-Rebollo, T., 2018. Computational modeling of gurney flaps and microtabs by POD method. *Energies*, 11(8), pp.2091.
<https://doi.org/10.3390/en11082091>

computational fluid dynamics method. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 17(8), pp.632–645.
<http://dx.doi.org/10.1631/jzus.A1500308>

21. Wang, Y, Li, Z, Zhang, H. and Liu, Y., 2021. An intelligent method for predicting the pressure coefficient curve of airfoil-based conditional generative adversarial networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and*

رویداد استادی نشسته