

# مدل سازی یک سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس با ترکیب نتایج حل عددی در بستر نیمه تحلیلی

سعید کریمیان علی آبادی\* (استادیار)

صابر رضایی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۴۰۱)  
دوری ۳-۲، شماره ۲، ص. ۳۷-۴۶، (پژوهشی)

در این تحقیق، تولید شبکه و شبیه سازی جریان سه بعدی در سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس، یکی از سامانه های نوین انرژی باد، به صورت عددی بررسی شده است. از نتایج حل عددی، در بستر نیمه تحلیلی (مدل آیرودینامیکی شبه پایا) به منظور مدل سازی و تخمین مشخصه های عملکردی سیستم مذکور استفاده شده و با ایجاد یک جفت سازی خارج از خط (کوپلینگ آفلاین)، نتایج حاصل از حل عددی به عنوان ورودی های کد تحلیلی BIM به کار رفته است. یک توربین باد بهینه و اختصاصی برای به کارگیری در بخش ونتوری سیستم اینولوکس، طراحی و ارائه شده است. با به کارگیری ضرایب تصحیح نوک پره و تصحیح توپی پرانتل و نیز ضریب اصلاح دنباله ی برتون و گلوآرت، به منظور پوشش اثرات سه بعدی، رفتار ضریب توان و ضرایب نیرو ارائه شده است. یک مطالعه ی جامع برحسب لامبدا (نسبت سرعت نوک پره) و طول بی بعد پره نیز صورت گرفته است. نتایج اعتبارسنجی هر دو شیوه ی حل عددی و تحلیلی نشان می دهد که هر دو شیوه ی انتخاب شده، با داده های مرجع مطابقت دارند. بر پایه ی همین دستاوردها می توان مشاهده کرد که سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس قادر است سرعت جریان را در بخش ونتوری به میزان حدود ۷۰ درصد افزایش دهد و انرژی بیشتری از داکت و شroud فراهم سازد. با هدف مقایسه ی ضرایب تصحیح دنباله ی آشفتنه، بر اساس نتایج کد توسعه داده شده، اختلاف مدل برتون و مدل گلوآرت در تخمین ضریب توان همواره از ۱۵ درصد کم تر است.

واژگان کلیدی: انرژی باد، سیستم اینولوکس، حل عددی، کد نیمه تحلیلی، تصحیح پرانتل، ضریب تصحیح دنباله.

karimian@modares.ac.ir  
saberrezaey@modares.ac.ir

## ۱. مقدمه

جریان را در بخش ورودی اینولوکس تأمین می کند، دوماً جریان خروجی از بخش انتهایی اینولوکس باید با آن هماهنگ باشد. مفهوم اینولوکس توسط علاایی و اندروپولوس<sup>[۲]</sup> مطرح شد. این طرح ادعا می کند که با کاهش هزینه های نصب و نگهداری توربین های بادی مرسوم، تحول عظیمی در صنعت انرژی باد ایجاد کرده است.

علاایی و همکارانش<sup>[۲]</sup> همچنین توربین های بادی متوالی در سیستم توربین بادی اینولوکس را با استفاده از روش تجربی بررسی کردند و دریافتند که در مقایسه با حالتی که فقط یک توربین در سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس قرار دارد، بازده سیستم برای دو توربین به میزان ۵۲ درصد و برای سه توربین به میزان ۷۲ درصد افزایش می یابد. صداقت و همکارانش<sup>[۵]</sup> برای توربین های پوشش دار، سه محفظه ی توخالی به شکل های استوانه ای، نازل مانند و دیفیوزر مانند به صورت سه بعدی طراحی کرده و سپس آن ها را برای جریان های خارجی افقی و عمودی، به صورت تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق برای محفظه ی نازل مانند مشاهده شد که در قسمت ورودی نازل به علت ایجاد یک ناحیه ی

طراحی پره های توربین های بزرگ و متداول امروزی هم از نظر آیرودینامیکی و هم از نظر مکانیکی کاری دشوار و پیچیده است و از طرفی تعمیر و نگهداری آن ها هزینه ی بسیاری را تحمیل می کند. در صورتی که پره های توربین به کار رفته در سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس در دسترس تر است و چون ابعاد کوچک تری دارند، تعمیر و نگهداری آن ها نیاز به صرف انرژی و هزینه ی چندانی نخواهد داشت. شبیه سازی عملکرد سیستم اینولوکس به دلیل اثر متقابل بدنه ی سیستم، جریان باد و پره های توربین، نسبتاً پیچیده بوده و همچون بسیاری از مسائل مهندسی نیازمند دینامیک سیالات محاسباتی<sup>[۱]</sup> است. اخیراً مطالعات گسترده یی در مورد مدل سازی و تحلیل جریان باد داخل اینولوکس و همچنین میدان جریان خارجی حول این سیستم صورت گرفته است. تحلیل جریان خارجی حول سیستم اینولوکس دقیقاً همانند جریان داخل آن اهمیت دارد چرا که اولاً

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۸/۲۵، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۰/۲۸، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۲۴.

DOI:10.24200/J40.2020.59289.1626

## ۲. معادلات حاکم

### ۱.۲. معادلات حاکم بر نظریه BIM

نظریه BIM از تلفیق دو روش نظریه المان پره و نظریه تکانه به دست آمده است. در نظریه مومنتوم یک بعدی توربین بادی به عنوان یک دیسک محرک یعنی با تعداد نامحدودی پره در نظر گرفته می شود. جریان حول این دیسک عملگر همگن، تراکم ناپذیر و پایا بوده و چون دیسک عملگر ثابت در نظر گرفته می شود، پس مؤلفه سرعت چرخشی در دنباله جریان وجود ندارد.

همچنین فرض می شود حجم معیار جریان در پایین دست و بالادست صفحه ی روتور گسترش یافته است. علاوه بر آن، هیچ نیروی خارجی بر سیال در بالادست و پایین دست جریان اعمال نمی شود پس فشار استاتیکی با زبایی شده به فشار جریان آزاد می رسد. تنها نیروی تولید شده در صفحه ی روتور، نیروی پیشرانده است که از افت اندازه حرکت حاصل می شود و در تمام سطح دیسک یکنواخت است. جریان گذرنده از صفحه ی روتور توربین بادی در شکل ۱ آورده شده است. در نهایت می توان با استفاده از قانون برنولی، نیروی پیشران را مطابق رابطه ی ۱ استخراج کرد:

$$T = \frac{1}{4} \rho A U_{\infty}^2 [4a(1-a)] \quad (1)$$

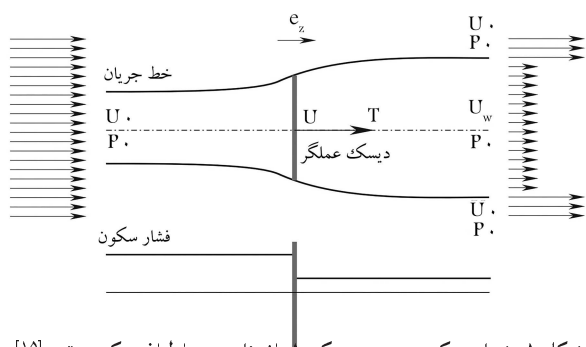
که در آن  $a$  ضریب القایی محوری است. برخلاف مفهوم دیسک عملگر، در نظریه ی اندازه حرکت، اندازه حرکت زاویه یی ایجاد شده توسط دیسک عملگر چرخشی است که به آن گشتاور گفته می شود. جریان پشت روتور را نیز که مخالف جهت چرخش روتور می چرخد، چرخش دنباله می نامند. اگر انرژی جنبشی مورد نیاز جهت چرخش دنباله از انرژی به دست آمده از دیسک عملگر کم شود، پس کار مفید کاهش می یابد. چرخش دیسک عملگر مؤلفه ی مماسی را به وجود می آورد. تراست در یک المان حلقوی را می توان توسط معادله ی ۲ نشان داد.

$$dT = \frac{1}{4} \rho \Omega^2 r^2 [4a'(1+a')] (2\pi r dr) \quad (2)$$

که در آن  $a'$ ، ضریب القایی مماسی بوده و به صورت  $a' = \frac{\omega}{\Omega}$  تعریف می شود.  $\omega$  سرعت زاویه یی چرخش روتور و  $\Omega$  سرعت زاویه یی چرخش جریان است. با استفاده از قانون بقای تکانه زاویه یی، گشتاور روتور و توان تولیدی را می توان به صورت زیر به دست آورد.

$$dQ = 4\pi \rho U_{\infty} a' (1-a) \Omega r^2 dr \quad (3)$$

$$dP = \frac{1}{4} \rho A U_{\infty}^2 \left[ \frac{\lambda}{\lambda^2} a' (1-a) \lambda_r^2 d\lambda_r \right] \quad (4)$$



شکل ۱. شمای یک بعدی حجم کنترل انتخابی در اطراف یک روتور. [۱۵]

پرفشار، سرعت جریان دچار کاهش شده است که با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. پاتیل و همکارانش [۶] یک سیستم اینولوکس را در ابعاد کوچک تر طراحی کرده و ساختند. هدف اصلی آنان بررسی و انتخاب یک ماده ی مناسب برای ساخت بدنه ی سیستم اینولوکس است. آن ها به این نتیجه رسیدند که اگر بدنه ی اینولوکس از فیبرهای پلاستیکی تقویت شده ساخته شود توان خروجی سیستم بیشترین مقدار خواهد بود ولی به دلیل برخی معایب، با وجود کم تر شدن توان خروجی در حالت استفاده از فولاد نرم، می توان به جای فیبرهای پلاستیکی تقویت شده از فولاد نرم استفاده کرد.

آکور و باتاینه [۷] پارامترهای مؤثر در طراحی اینولوکس را به منظور دستیابی به یک طراحی بهینه برای افزایش سرعت در بخش ونتوری به صورت عددی و با مدل سازی سه بعدی مورد بررسی و تحلیل قرار داده و در نهایت طراحی بهینه یی برای این سیستم ارائه کرده اند. نتایج نشان می دهد که بیشترین سرعت در بخش ونتوری زمانی حاصل می شود که بدنه ی سیستم اینولوکس با جهت باد زاویه یی بین ۴۵ تا ۴۵ درجه داشته باشد. بهات و همکارانش [۸] با کاهش قطر بخش ونتوری اینولوکس و استفاده از سه پره ی توربین داخل بخش ونتوری، به بررسی عملکرد و توان خروجی سیستم به روش عددی و با استفاده از مدل سازی سه بعدی پرداختند. آن ها دریافتند که اگر قطر بخش ونتوری سیستم اینولوکس موجود را به یک مقدار بهینه کاهش دهند، سرعت جریان در توربین های دوم و سوم و در نتیجه توان خروجی این توربین ها افزایش می یابد.

صنعت انرژی باد همچنان می بایست بر اساس هزینه با منابع تولیدی مرسوم رقابت کند. اگرچه هزینه ی انرژی باد در چند دهه گذشته به طرز چشمگیری کاهش یافته است اما پروژه های بادی باید بتوانند از نظر اقتصادی با کم ترین هزینه برای تولید برق رقابت کنند. هرچه مدل سازی توربین های بادی با دقت بیشتری انجام پذیرد، این رقابت سودمندتر خواهد بود. اساس مدل سازی توربین های بادی نظریه ی BIM است که توسط گلوآرت [۹] ارائه شده است.

هسیانو و همکارانش [۱۰] سه مدل مختلف از توربین های بادی محوری را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که توربین باد با پره هایی با توزیع وتر و زاویه یی پیشش بهینه شده بیشترین ضریب توان را تولید می کند. کریمیان و همکارانش [۱۱-۱۳] با استفاده از نظریه BIM به بررسی و مدل سازی عملکرد توربین های بادی مختلف در شرایط پایا و ناپایا پرداختند و نشان دادند که نظریه BIM توانایی قابل توجهی در این خصوص دارد. طحانی و همکارانش [۱۴] با استفاده از نظریه BIM و پس از خطی سازی توزیع وتر و زاویه یی پیشش، نتیجه گرفتند که ۶۰ تا ۶۴ درصد وتر و ۳۰ تا ۳۷ درصد پره بهترین نقاط برای اعمال خطی سازی هستند.

در پژوهش حاضر با تأکید بر استفاده از هر دو بستر عددی و تحلیلی، به مدل سازی و بررسی پارامتری سیستم جاذب انرژی بادی اینولوکس و نیز توربین بادی تعبیه شده در بخش ونتوری آن پرداخته شده است. ترکیب دو بستر عددی و تحلیلی در این مطالعه به صورت خارج از خط آفلاین صورت گرفته است. بدین معنی که در ابتدا هندسه سیستم اینولوکس و جریان عبوری از آن به وسیله حل عددی مدل شده و خروجی های این حل به عنوان ورودی های کد نیمه تحلیلی نظریه BIM در نظر گرفته شده اند. سپس با استفاده از نتایج حاصل از نظریه مذکور به بررسی تأثیر ضرایب مختلف اصلاح نظریه BIM و تغییرات پارامترهای آیرودینامیکی برحسب سرعت نوک پره و نیز در راستای پره پرداخته شده است.

جدول ۱. مدل‌های گلوآرت و برتون برای تصحیح دنباله آشفته.

مدل	ضریب القایی محوری بحرانی	ضریب نیروی پیشران اصلاح شده
گلوآرت <sup>[۹]</sup>	۰٫۲	$\frac{2}{3}a(1 - \frac{(5-2a)a}{4})F_T$
برتون و همکاران <sup>[۱۷]</sup>	۰٫۳۲۶۲	$\frac{1}{1.816} - \frac{2}{3}(\sqrt{1.816} - 1)(1 - a)$

پس از این که نظریه‌های تکانه و المان پره به‌طور کامل تشریح شدند، حال می‌توان آن‌ها را ترکیب و روابط مورد نیاز را استخراج کرد. به این ترتیب که نیروی پیشران به دست آمده برای هر کدام از المان‌های حلقوی در راستای پره توسط نظریه‌ی تکانه و نظریه‌ی المان پره با هم برابر قرار می‌گیرند. حال می‌توان با استفاده از روابط ۸ تا ۱۰ به محاسبه‌ی نیروی پیشران، گشتاور و توان پرداخت:

$$T = B \sum_{i=1}^N F_{n_i} \quad (۸)$$

$$Q = B \sum_{i=1}^N F_{t_i} r_i \quad (۹)$$

$$P = \Omega B \sum_{i=1}^N F_{t_i} r_i = \Omega Q \quad (۱۰)$$

## ۲.۲. معادلات حاکم بر سیستم اینولوکس

از آن‌جا که در سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس فیزیک مسئله با آنچه در توربین‌های بادی متداول متصور می‌شود تفاوت دارد، بنابراین لازم است در بررسی این سیستم برخی ملاحظات نظری اضافه شود. لذا معادلات بقای جرم و انرژی و معادلات مومنوم خطی و زاویه‌ی بر روی یک حجم کنترل برای میدان سیال غیر لزج، تراکم‌ناپذیر و مقارن به فرم انتگرالی و به‌صورت زیر خواهند بود.<sup>[۴-۲]</sup>

$$\oint_A \rho V \cdot dA = 0 \quad (۱۱)$$

$$\oint_A u_z \rho V \cdot dA = T - \oint_A P dA \cdot e_z \quad (۱۲)$$

$$\oint_A \rho V \cdot dA = 0 \quad (۱۳)$$

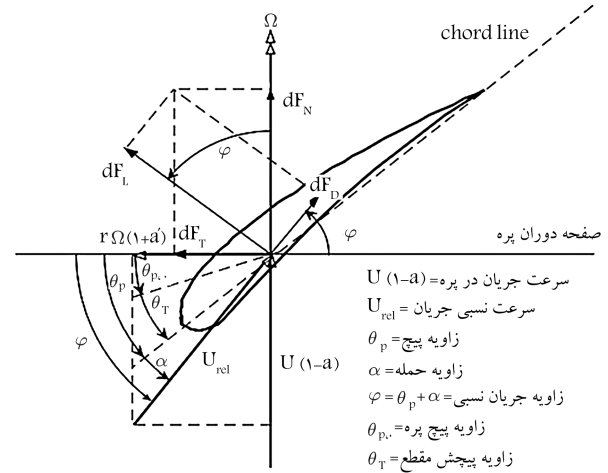
$$\oint_A r u_{\theta} \rho V \cdot dA = Q_T \quad (۱۴)$$

$$\oint_A \left[ \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \|V^*\|^2 \right] \rho V \cdot dA = P \quad (۱۵)$$

که در این معادلات  $V = (u_r, u_{\theta}, u_z)$  بردار سرعت،  $r$  شعاع،  $A$  بردار مساحت سطح کنترل،  $\rho$  چگالی هوا،  $e_z$  بردار یکه‌ی محور  $z$  ها،  $p$  فشار،  $T$  نیروی محوری،  $Q_T$  گشتاور و  $P$  توان استحصال شده توسط پره است. در شکل ۳ مدل یک بعدی جریان عبوری از بخش ونتوری سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس و محل دقیق قرارگیری توربین در این بخش از سیستم نشان داده شده است.

اگر سرعت متوسط باد قبل از پره برابر  $U_1$  در نظر گرفته شود، با توجه به معادله‌ی بقای جرم با عبور جریان از کانال با سطح مقطع ثابت، سرعت بدون تغییر باقی می‌ماند.

از آن‌جا که آنتالپی دبی جرمی جریان آزاد برابر  $\frac{P}{\rho} = \left[ \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \|V^*\|^2 \right]$  است، لذا جریان بیان می‌شود که در آن  $P = P_0 + \frac{1}{2} \rho V^2$  و فشار کل و برابر  $P_0 = p + \frac{1}{2} \rho V^2$  است،



شکل ۲. جزئیات نیروهای آیرودینامیکی وارد بر پره.<sup>[۱۶]</sup>

که  $\lambda_r = \frac{\Omega r}{U_{\infty}}$  نسبت سرعت نوک پره محلی و  $\lambda = \frac{\Omega R}{U_{\infty}}$  نسبت سرعت نوک پره هستند.

برای در نظر گرفتن مشخصات هندسی پره، از نظریه‌ی المان پره استفاده می‌شود که در آن پره روتور به تعداد معینی المان در راستای دهانه بال تقسیم می‌شود و فرض بر این است که هیچ برهم‌کنش آیرودینامیکی بین المان‌ها وجود نداشته باشد. در نهایت با انتگرال‌گیری در راستای پره می‌توان نیرو و ممان کل وارد بر هر پره را به دست آورد. تحلیل نیروهای آیرودینامیکی وارد بر پره در شکل ۲ آورده شده است. با فرض تعداد مشخصی المان روی هر پره، نیروی پیشران و گشتاور وارد بر هر المان نیز چنین محاسبه خواهد شد:

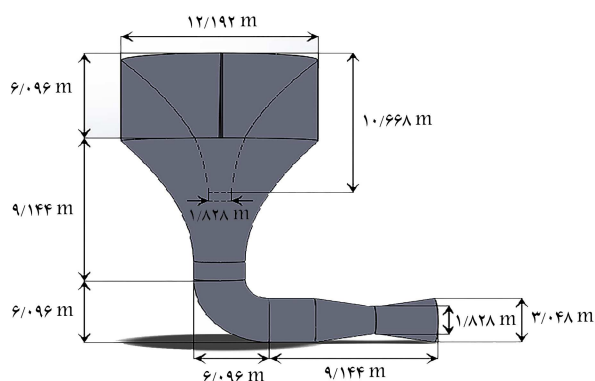
$$dQ = \sigma \pi \rho \frac{(1-a)^2 U_{\infty}^2}{\sin^2 \phi} (C_L(\sin \phi) - C_d(\cos \phi)) r dr \quad (۵)$$

$$dT = \sigma \pi \rho \frac{(1-a)^2 U_{\infty}^2}{\sin^2 \phi} (C_L(\cos \phi) + C_d(\sin \phi)) r dr \quad (۶)$$

گردابه‌های نوک بال برای یک روتور با تعداد پره محدود، متفاوت از یک روتور با تعداد پره بی‌نهایت است. با در نظر گرفتن تعداد پره محدود و اعمال حضور گردابه‌های نوک هر پره، نیرو و گشتاور باید تعدیل شوند. در واقع اصلاح پراپل اثر عدم پیوستگی دیسک دوران را لحاظ می‌کند. ضریب اصلاح پراپل به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F = \left[ \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( e^{-\frac{B}{4} - \frac{R-r}{r \sin(\phi)}} \right) \right] \left[ \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( e^{-\frac{B}{4} - \frac{r-R}{r \sin(\phi)}} \right) \right] \quad (۷)$$

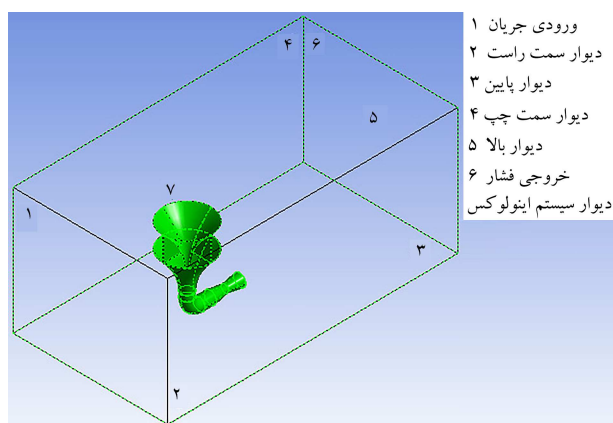
برای مقادیر ضریب القایی محوری بزرگ‌تر از  $0.5$  نظریه‌ی تکانه بی‌اعتبار شده و نمی‌تواند پیش‌بینی درستی از ضریب نیروی پیشران توربین باد ارائه دهد. بنابراین نیاز است که اصلاحاتی به روابط به دست آمده اعمال شود. برای این منظور روابطی توسط گلوآرت<sup>[۹]</sup> و برتون<sup>[۱۷]</sup> ارائه شده که در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۴. ابعاد سیستم اینولوکس.

جدول ۲. مشخصات هندسی سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس.

پارامتر	نماد	ابعاد (متر)
قطر بالایی قیفی	$D_{Funnel, Upper}$	۱۲/۱۹
ارتفاع کل	$H$	۲۱/۳۴
ارتفاع قیفی	$H_{Funnel}$	۱۰/۶۷
قطر پایینی قیفی	$D_{Funnel, Lower}$	۱/۸۳
ارتفاع ورودی	$H_{Inlet}$	۶/۱
قطر ونتوری	$D_{Venturi}$	۱/۸۳
قطر خروجی	$D_{Outlet}$	۳/۰۵

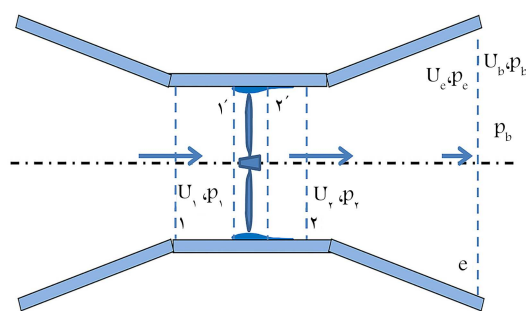


شکل ۵. دامنه‌ی حل مسئله (ابعاد به متر هستند).

شبکه تولید شده در نزدیکی دیواره‌ها کوچک‌تر باشد تا حل عددی از اعتبار بیشتری برخوردار شود. در شکل ۵ دامنه‌ی حل مسئله و در شکل ۶ نمایی از شبکه‌ی ایجاد شده ارائه شده است.

برای هندسه مذکور، مناسب‌ترین شبکه‌بندی پس از بررسی استقلال از شبکه در حالتی رخ می‌دهد که تعداد سلول‌ها برابر ۱۸۰۳۷۱۰ باشد. با انتخاب این شبکه هزینه‌ی حل عددی برای دستیابی به مناسب‌ترین نتیجه کمینه می‌شود.

همچنین شرط مرزی سرعت در ورودی، شرط مرزی فشار (فشار خروجی برابر فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است) و شرط مرزی دیوار برای سایر بخش‌های هندسه طراحی شده برای سیستم توربین بادی اینولوکس در نظر گرفته شده است. در هندسه‌ی طراحی شده فاصله‌ی دیوارهای اطراف سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس، به جز دیوار پائینی، به گونه‌ای انتخاب شده که تأثیری بر جریان باد نداشته باشند.



شکل ۳. مدل یک بعدی محل قرارگیری توربین و جریان عبوری از بخش ونتوری اینولوکس. [۳]

باد به عنوان منبع انرژی، نه تنها شامل انرژی جنبشی بلکه شامل انرژی پتانسیل هم هست. این انرژی واحد جرم جریان پس از ورود به سیستم، با مقداری افت، که در لحظه می‌توان از آن صرف نظر کرد، به موقعیت بالادست جریان پره می‌رسد. جریان داخل کانال، شامل سه بخش متمرکزکننده، ونتوری و دیفیوزر، می‌تواند به عنوان جریان داخل یک نازل - دیفیوزر در نظر گرفته شود که در آن گلوگاه نازل دقیقاً جایی است که پره قرار دارد و سطح مقطع آن برابر  $A^* = A_1 - A_T$  است؛  $A_T$  مساحت تصویر شده‌ی پره‌ها روی صفحه‌ی عمود بر جهت جریان است.

توان به دست آمده توسط پره، با معادله‌ی  $P = \oint_A \left[ \frac{P_c}{\rho} \right] \rho V \cdot dA$  بیان می‌شود. مقدار متوسط  $\frac{P_c}{\rho}$  در طول کانالی با سطح مقطع  $A_1$  توسط رابطه‌ی  $\left[ \frac{P_c}{\rho} \right]_{A_1} = \frac{1}{\dot{m}} \oint_A \left[ \frac{P_c}{\rho} \right] \rho V \cdot dA$  مشخص می‌شود که در آن  $\dot{m}$  دبی جرمی جریان در طول سیستم انتقال باد اینولوکس است. در نتیجه مقدار توان مطابق معادله‌ی ۱۶ به دست می‌آید:

$$P = \left( \left[ \frac{P_c}{\rho} \right]_1 - \left[ \frac{P_c}{\rho} \right]_2 \right) \dot{m} \quad (16)$$

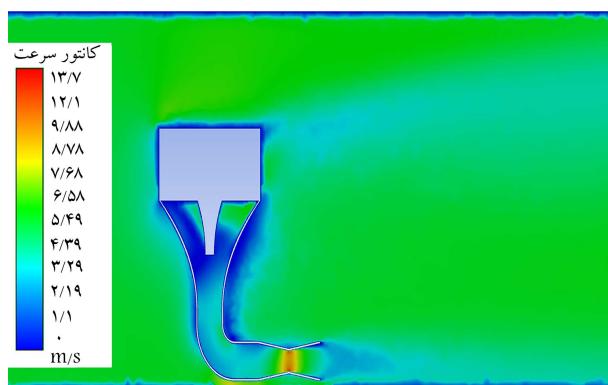
### ۳. پیاده‌سازی حل عددی

#### ۳.۱. معرفی هندسه سیستم اینولوکس

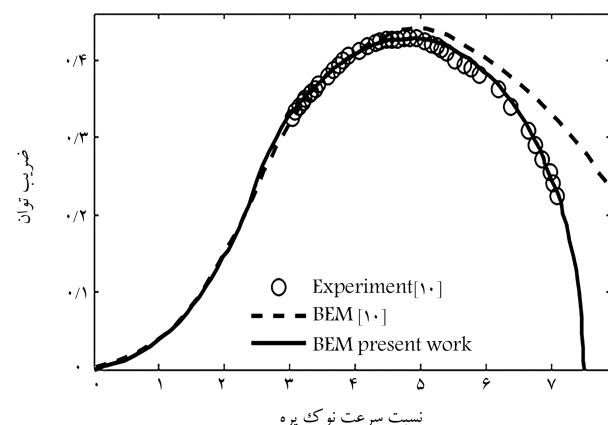
شکل ۴ ابعاد هندسه سه‌بعدی سیستم توربین بادی اینولوکس مورد مطالعه را نشان می‌دهد. ابعاد واقعی هندسه نیز در جدول ۲ آورده شده است. همان‌گونه که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، سیستم توربین بادی اینولوکسی طوری طراحی شده است که جریان باد را از تمام جهات، یعنی در یک دامنه‌ی ۳۶۰ درجه‌ای، جذب می‌کند و بنابراین نیازی به تنظیم مستقیم و یا غیرمستقیم جهت پره‌های توربین به سمت جهت وزش باد نیست. علاوه بر این، چهار پره‌ی هدایت‌کننده در ورودی سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس وجود دارد که وظیفه آن‌ها کنترل و هدایت جریان باد ورودی به سیستم است. جریان باد جذب شده توسط ورودی سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس، به سمت پایین منتقل شده و پس از عبور از یک زانویی، در بخش ونتوری به پره‌های توربین یا توربین‌های تعبیه شده در سطح زمین و داخل کانال افقی سیستم توربین بادی اینولوکس، تابیده می‌شود.

#### ۳.۲. شبکه‌بندی مسئله، استقلال از شبکه و شرایط مرزی

در مطالعه‌ی حاضر به دلیل پیچیدگی و سه‌بعدی بودن هندسه، از شبکه‌بندی بدون ساختار استفاده شده است. به منظور افزایش دقت مدل‌سازی عددی و بررسی هرچه دقیق‌تر جدایش جریان در نزدیکی دیواره‌ها و اثرات آن، سعی شده است که



شکل ۷. کانتور سرعت برای سرعت جریان ورودی ۶/۷۱ متر بر ثانیه.



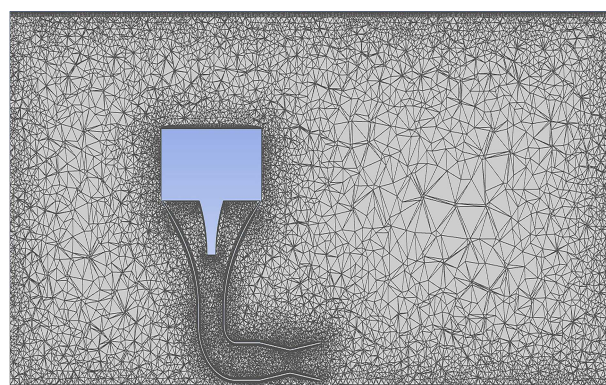
شکل ۸. مقایسه‌ی ضریب توان برحسب لامبدا برای کار حاضر با نتایج موجود [۱۰].

توربین‌های بادی نام برد. در واقع جریان باد داخل سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس و در یک بخش ونتوری مانند، شتاب می‌گیرد و سرعتش افزایش پیدا می‌کند. بنابراین جریان بادی که توسط پره‌های توربین تعبیه شده داخل سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس حس می‌شود، سرعت بیشتری نسبت به جریان آزاد باد خواهد داشت و همین امر سبب می‌شود که بازدهی سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس نسبت به توربین‌های امروزی بیشتر باشد. در نتیجه از این سیستم می‌توان حتی در مناطقی که سرعت وزش باد در آن‌ها پایین است، استفاده کرد.

#### ۴. پیاده‌سازی کد نیمه‌تحلیلی

##### ۴.۱. اعتبارسنجی کد نیمه‌تحلیلی

به منظور اعتبارسنجی کد متلب BIM، از هندسه و نتایج تجربی و تحلیلی (حاصل از نظریه‌ی BIM) حاصل از بررسی محققان پیشین<sup>[۱۰]</sup> استفاده شده است. هندسه در نظر گرفته شده برای این منظور، توربین بهیبه شده توسط رفرنس مذکور است که دارای قطر ۰/۷۲ متر، ۳ پره، توان نامی ۵۰ وات و لامبدا ۵ در نقطه طراحی است. در شکل ۸ مقایسه‌ی نتایج ضریب توان برحسب سرعت نوک پره حاصل از کد BIM طراحی شده در کار حاضر، با در نظر گرفتن تأثیر ضرایب اصلاح نوک پره و تویی پراتل و نیز تصحیح گلوآرت، با نتایج تجربی و تحلیلی موجود<sup>[۱۰]</sup> ارائه شده که نشان‌دهنده‌ی توافق قابل ملاحظه‌ی نتایج است.



شکل ۹. نمای روبرویی از شبکه ایجاد شده برای سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس.

جدول ۳. مقایسه نتایج کار حاضر با مقاله<sup>[۳۲]</sup> به منظور اعتبارسنجی حلگر.

علائی و اندروپولوس <sup>[۳۲]</sup>	کار حاضر	کیفیت شبکه
۶/۷۱	۶/۷۱	سرعت باد ورودی (m/s)
۱۰/۸۴۵	۱۰/۸۴۵	سرعت در ونتوری (m/s)
۱/۵۸	۱/۵۸	نسبت سرعت
۲/۳۱	۲/۳۱	درصد خطای نسبی

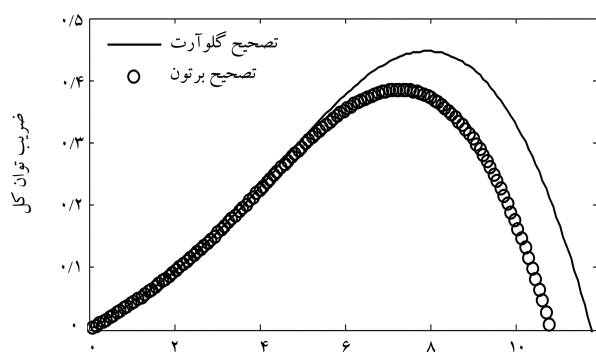
#### ۳.۳. اعتبارسنجی حل عددی

برای اعتبارسنجی حل‌گری که به منظور شبیه‌سازی عددی جریان در سیستم توربین بادی اینولوکس مورد استفاده قرار گرفته است، در ابتدا شرایط مسئله مطابق آنچه در مقاله علائی و اندروپولوس<sup>[۳۲]</sup> آورده شده است، در نظر گرفته شد. در این مقاله سرعت جریان باد ثابت و برابر ۶/۷۱ متر بر ثانیه و خلاف جهت مثبت محور Z در نظر گرفته شده است و ابعاد هندسی سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس طراحی شده با آنچه در کار حاضر آورده شده یکسان است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از کار حاضر در بهترین حالت شبکه‌بندی و مقاله<sup>[۳۲]</sup> برای میانگین سرعت جریان باد در بخش ونتوری و همچنین نسبت سرعت در جدول ۳ آورده شده است.

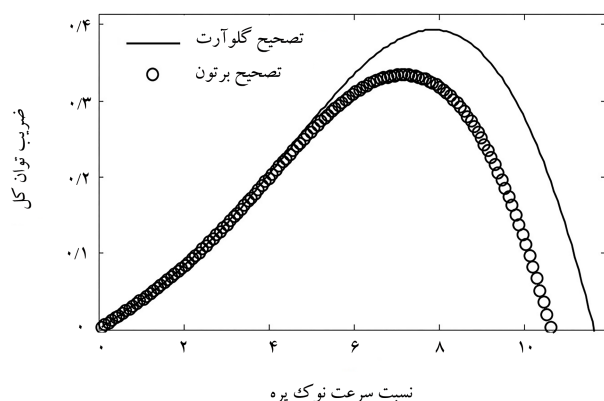
چنان که ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از کار حاضر با دقت بسیار بالایی و با حدود ۲ درصد خطا با نتایج حاصل از مدل با کیفیت عالی<sup>[۳۲]</sup> مطابقت دارد.

#### ۴.۳. نتایج حل عددی

حال که هندسه سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس و شرایط مرزی حاکم بر مسئله به‌طور کامل مشخص شد و اعتبارسنجی حل‌گر عددی نیز انجام شد، می‌توان با استفاده از بستر حل عددی، سرعت جریان در محل ونتوری را برای سرعت‌های باد ورودی مختلف استخراج کرده و به‌عنوان پارامتر ورودی کد نیمه تحلیلی از آن بهره گرفت. با فرض سرعت جریان آزاد ۶/۷۱ متر بر ثانیه، متوسط سرعت جریان در مرکز بخش ونتوری برابر ۱۰/۸۴۵ متر بر ثانیه و نسبت سرعت جریان در ونتوری به سرعت جریان در ورودی برابر ۱/۶۶۱ به دست می‌آید. کانتور سرعت برای سرعت جریان ورودی ۶/۷۱ متر بر ثانیه در شکل ۷ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که سرعت جریان در بخش ونتوری به‌طور چشمگیری زیاد شده است. این افزایش سرعت نسبت به سرعت جریان آزاد هوا، باعث می‌شود که سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس را بتوان به‌عنوان یک نوآوری مؤثر در حوزه‌ی



شکل ۱۰. ضریب توان برحسب لامبدا برای تصحیح گلوآرت و برتون و با احتساب ضریب اصلاح نوک پره پرانتل.



شکل ۱۱. ضریب توان برحسب لامبدا برای تصحیح گلوآرت و برتون و با فرض ضریب اصلاح نوک پره و تویی پرانتل.

### ۳.۴. مطالعه‌ی پارامتری برحسب لامبدا

به منظور تحلیل پارامترهای ایرو دینامیکی دخیل در توربین باد برحسب لامبدا، پس از انجام فرایند استقلال از شبکه، ۱۰۰ المان روی هر پره فرض شده است. در شکل ۱۰ نموداری از مقایسه‌ی تغییرات ضریب توان برحسب لامبدا برای دو حالت تصحیح دنباله آشفته گلوآرت و برتون و با در نظر گرفتن ضریب اصلاح نوک پره پرانتل برای هر دو حالت آورده شده است. چنان که ملاحظه می‌شود نمودار مربوط به تصحیح دنباله‌ی آشفته‌ی برتون همواره پایین نمودار مربوط به تصحیح دنباله آشفته گلوآرت است و این بدان معناست که تصحیح برتون نتایج کم‌تری را نسبت به تصحیح گلوآرت برای ضریب توان پیش‌بینی می‌کند. بیشینه ضریب توان در تصحیح گلوآرت برابر ۰/۴۵۷ بوده و در لامبدا ۷/۹۲۹ رخ می‌دهد. در صورتی که بیشینه ضریب توان در تصحیح برتون برابر ۰/۳۹۳ بوده و در لامبدا ۷/۱۹۴ اتفاق می‌افتد.

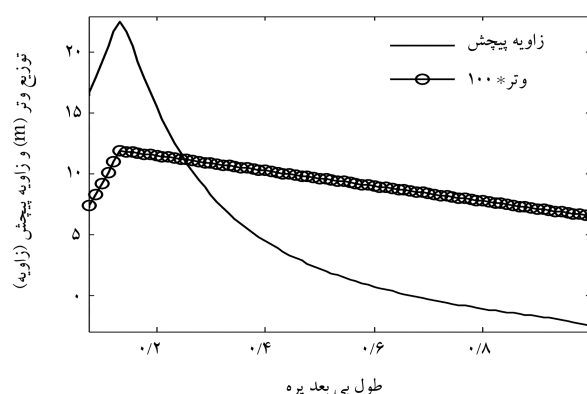
در شکل ۱۱ نمودار تغییرات ضریب توان برحسب لامبدا برای دو تصحیح گلوآرت و برتون و با در نظر گرفتن ضریب اصلاح نوک پره و تویی پرانتل برای هر دو حالت آورده شده است. چنان که ملاحظه می‌شود، مقدار بیشینه ضریب توان نسبت به حالتی که فقط ضریب اصلاح نوک پره اثر داده شده است، به علت ناشی از اعمال ضریب اصلاح بخش تویی کاهش یافته است. در این حالت بیشینه ضریب توان در حالت تصحیح گلوآرت برابر ۰/۳۸۱۳ بوده و در لامبدا ۷/۸۷۶ رخ می‌دهد. در صورتی که بیشینه ضریب توان در تصحیح برتون

جدول ۴. اطلاعات مربوط به توربین مرجع.<sup>[۱۸]</sup>

مقدار	مشخصه
۳	تعداد پره
۰/۸۱۹۲ متر	طول هر پره
۱/۷۳۳۶ متر	قطر روتور
۰/۰۹۵۲ متر	قطر تویی

جدول ۵. اطلاعات ایرفویل S۸۲۲ - NREL در عدد رینولدز ۱۰<sup>۵</sup>.<sup>[۲۰]</sup>

مقدار	مشخصه
۹	$N_{crit}$
۹۴/۷	$(C_L/C_D)_{max}$
۵/۷۵°	$\alpha_{opt}$
۰/۸۵۸۲	$C_{L,\alpha_{opt}}$
۰/۰۰۹۰۶	$C_{D,\alpha_{opt}}$



الف) توزیع وتر و توزیع زاویه‌ی پیش بهینه در راستای پره؛



ب) شمای کلی پره طراحی شده با مقطع S۸۲۲ - NREL.

شکل ۹. نمودار توزیع وتر و زاویه‌ی پیش بهینه و شمای کلی پره طراحی شده.

### ۲.۴. هندسه‌ی پره‌های توربین

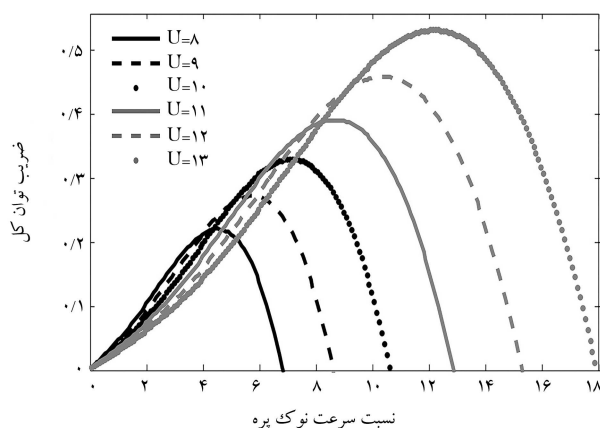
مشخصات مربوط به توربین طراحی شده به منظور بهره‌گیری در بخش ونتوری سیستم اینولوکس با توجه به نتایج ارائه شده توسط دسموخ و همکارانش<sup>[۱۸]</sup> که از طریق بستر حل عددی به طراحی توربین برای سیستم اینولوکس پرداخته بودند، در نظر گرفته شده است. این اطلاعات در جدول ۴ گزارش شده‌اند.

تانجیرو سومرز<sup>[۱۹]</sup> برای پره‌های با طول زیر ۵ متر، ایرفویل S۸۲۲ - NREL را پیشنهاد کرده‌اند که به علت طول کم پره‌ها در این مقاله از همین ایرفویل برای تمام مقاطع پره (به جز بخش تویی که از ایرفویل دایروی برای آن استفاده شده) بهره گرفته شده است. در جدول ۵ داده‌های مربوط به ایرفویل S۸۲۲ - NREL<sup>[۲۰]</sup> در عدد رینولدز ۱۰<sup>۵</sup>، که محدوده‌ی عملکردی توربین کار حاضر با توجه به سرعت جریان باد و هندسه پره‌ها است، آورده شده‌اند.

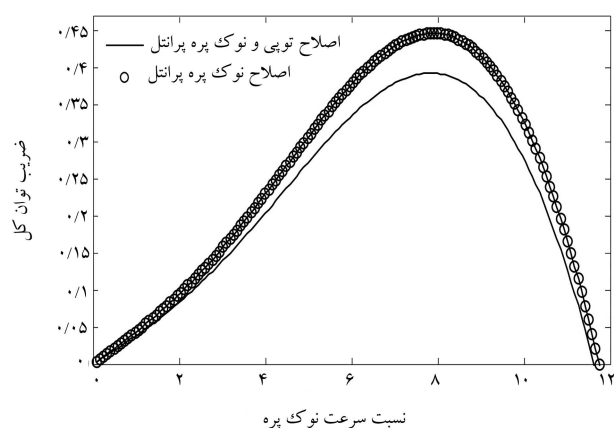
در نهایت نمودار توزیع وتر و زاویه‌ی پیش بهینه و نیز شمای کلی پره‌های طراحی شده به صورت شکل ۹ به دست می‌آید.

جدول ۶. ضریب توان بیشینه برای دو تصحیح گلوآرت و برتون.

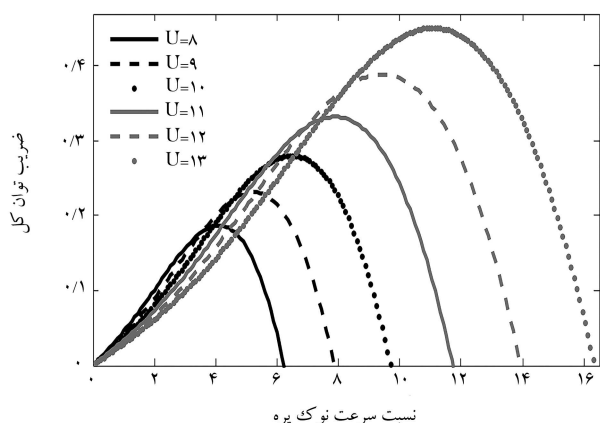
مدل	ضریب توان بیشینه	لامبدا در ضریب توان بیشینه
تصحیح گلوآرت و اثر اصلاح نوک پره	۰/۴۵۷	۷/۹۲۹
تصحیح گلوآرت و اثر اصلاح نوک پره و توپی	۰/۳۸۱۳	۷/۸۷۶
تصحیح برتون و اثر اصلاح نوک پره	۰/۳۹۳	۷/۱۹۴
تصحیح برتون و اثر اصلاح نوک پره و توپی	۰/۳۳۵	۷/۱۹۴



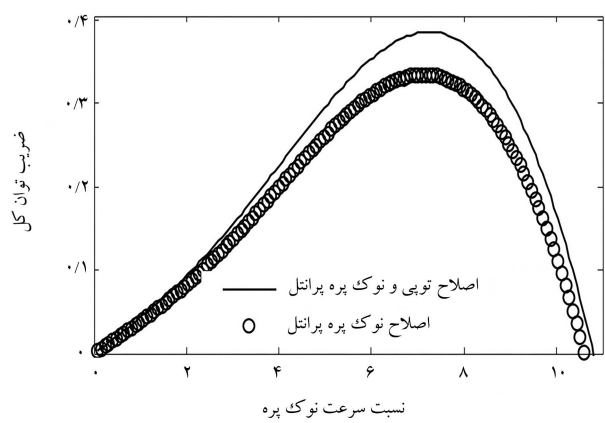
شکل ۱۴. ضریب توان برحسب لامبدا برای سرعت‌های باد مختلف (متر بر ثانیه) و با فرض تصحیح گلوآرت و ضریب اصلاح نوک پره و توپی پراوتل.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی ضریب توان برحسب لامبدا برای ضریب اصلاح نوک پره و توپی پراوتل و با فرض تصحیح گلوآرت.



شکل ۱۵. ضریب توان برحسب لامبدا برای سرعت‌های باد مختلف (متر بر ثانیه) و با فرض تصحیح برتون و ضریب اصلاح نوک پره و توپی پراوتل.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی ضریب توان برحسب لامبدا برای ضریب اصلاح نوک پره و توپی پراوتل و با فرض تصحیح برتون.

شده است. مشهود است که لامبدایی که در آن بیشینه ضریب توان رخ می‌دهد در حالت‌های تصحیح گلوآرت و برتون و برای اثر ضریب اصلاح نوک پره و اثر ضریب اصلاح نوک پره و توپی تغییری ناچیز داشته است.

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مقایسه‌ی ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک پره برای سرعت‌های باد مختلف و با در نظر گرفتن تصحیح گلوآرت و برتون و ضریب اصلاح نوک پره و توپی پراوتل برای تعداد پره ۳ آورده شده است. چنان‌که به وضوح ملاحظه می‌شود، با افزایش سرعت جریان بادی که به پره‌های توربین می‌تابد، مقدار ضریب توان بیشینه افزایش یافته و این ضریب توان بیشینه در لامبدا بیشتری رخ می‌دهد. داده‌های مربوط به مقدار ضریب توان بیشینه و نیز لامبدا متناظر در جداول ۷ و ۸ آورده شده است.

برابر ۰/۳۳۵ بوده و در لامبدا ۷/۱۹۴ اتفاق می‌افتد. پس از دخالت دادن اثر ضریب اصلاح توپی پره، بیشینه ضریب توان در حالت تصحیح گلوآرت ۰/۸۳۴۴ برابر و در حالت تصحیح برتون ۰/۸۵۲۴ برابر شده است. اما لامبداهایی که این بیشینه‌های ضریب توان در آن‌ها رخ می‌دهد، تغییر ناچیزی داشته‌اند. در نتیجه می‌توان گفت که تأثیر ضریب اصلاح توپی پره فقط در کاهش ضریب توان است.

در جدول ۶ مقایسه‌ی ضریب توان برای دو تصحیح گلوآرت و برتون و اثر ضریب اصلاح نوک پره و اثر توام ضریب اصلاح نوک پره و توپی پراوتل آورده شده است. نمودار مربوط به ضریب توان برحسب لامبدا برای ضریب اصلاح نوک پره و توپی پراوتل و با در نظر گرفتن تصحیح گلوآرت و برتون در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده



جدول ۷. ضریب توان بیشینه برای تصحیح گلوآرت و با فرض اثر ضریب اصلاح نوک پره و تویی پراتنل برای سرعت های باد مختلف.

سرعت باد ( $m/s$ )	ضریب توان بیشینه	لامبدا در ضریب توان بیشینه
۸	۰٫۲۲۰۲	۴٫۵۳۲۳
۹	۰٫۲۷۲	۵٫۷۱۰۷
۱۰	۰٫۳۲۸۹	۷٫۱۶۱
۱۱	۰٫۳۹۰۹	۸٫۷۰۲
۱۲	۰٫۴۵۸۲	۱۰٫۳۳۳۶
۱۳	۰٫۵۳۰۶	۱۲٫۱۴۶۵

جدول ۸. ضریب توان بیشینه برای تصحیح برتون و با فرض اثر توام ضریب اصلاح نوک پره و تویی پراتنل برای سرعت های باد مختلف.

سرعت باد ( $m/s$ )	ضریب توان بیشینه	لامبدا در ضریب توان بیشینه
۸	۰٫۱۸۷۴	۴٫۰۷۹
۹	۰٫۲۳۱۴	۵٫۲۵۷۴
۱۰	۰٫۲۷۹۷	۶٫۵۲۶۵
۱۱	۰٫۳۳۲۳	۷٫۸۸۶۱
۱۲	۰٫۳۸۹۳	۹٫۴۲۷۱
۱۳	۰٫۴۵۰۶	۱۱٫۰۵۸۷

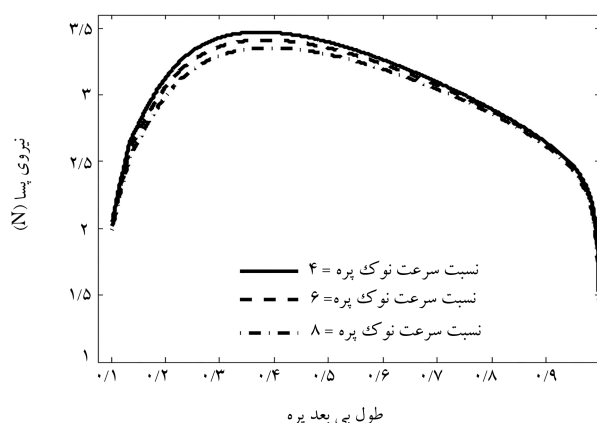
جدول ۹. نقطه ی طراحی توربین طراحی شده.

مشخصه	مقدار
سرعت جریان باد (متر بر ثانیه)	۱۰٫۸۴۵
تعداد پره	۳
ضریب توان	۰٫۳۸۱۳
لامبدا	۷٫۸۷۶
سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	۹۶

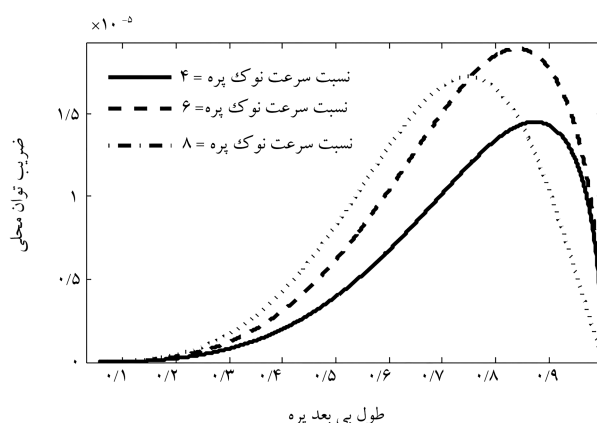
#### ۴.۴. مطالعه ی پارامتری برحسب طول بی بعد پره

چنان که مطرح شد، سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس توانایی قابل توجهی در افزایش راندمان جذب انرژی از جریان باد دارد و می تواند حدوداً ۶۶ درصد سرعت جریان باد آزاد را افزایش دهد. با افزایش سرعت جریان بادی که به پره های توربین تابیده می شود، مقادیر پارامترهای آیرودینامیکی توربین باد دستخوش تغییر خواهد شد. برای بررسی تغییرات این پارامترها، که ناشی از افزایش سرعت چشمگیر جریان باد توسط سیستم اینولوکس است، لازم است که یک لامبدا مشخص برای بررسی پارامترهای آیرودینامیکی مختلف در امتداد طول بی بعد پره مشخص شود. بهتر است که این لامبدا همان لامبدا ی مربوط به نقطه طراحی بهینه باشد تا نتایج خروجی را بتوان از نظر کیفی مورد بررسی دقیق تر قرار داد. جدول ۹ اطلاعات مربوط به نقطه طراحی توربین بادی طراحی شده در کار حاضر را نشان می دهد.

با مشخص بودن نقطه ی بهینه ی طراحی، می توان نمودار پارامترهای مختلف در



شکل ۱۶. نیروی پسا در راستای پره برای لامبدا های مختلف.



شکل ۱۷. ضریب توان در راستای پره برای لامبدا های مختلف.

راستای طول پره را برای این نقطه رسم کرد. با فرض  $50^\circ$  المان روی هر پره می توان به بررسی دقیق نحوه تغییرات کمیت های مختلف در راستای پره پرداخت. در شکل ۱۶ که در آن تغییرات نیروی پسا در راستای طول بی بعد پره برای لامبدا های مختلف آورده شده است، ملاحظه می شود که با افزایش لامبدا، نیروی پسا دچار کاهش می شود. ضمناً به وضوح قابل ملاحظه است که نیروی پسا در ابتدای پره صعودی بوده و پس از رسیدن به یک نقطه بیشه در نقاط ابتدایی پره، نزولی می شود. افزایش نیروی پسا در نقاط ابتدایی در واقع به علت افزایش طول وتر (مطابق شکل ۹) در این نواحی است. همچنین چون نقاط ابتدایی پره در محدوده ی استال قرار دارند، بنابراین نیروی پسا در این نقاط نسبت به نقاط انتهایی پره بیشتر است.

در شکل ۱۷ نمودار ضریب توان در راستای پره برای لامبدا های مختلف دیده می شود. در ابتدا با افزایش لامبدا، مقدار بیشینه ضریب توان محلی افزایش یافته و از نوک پره دور می شود. اما با رسیدن به یک لامبدا ی مشخص روند تغییرات عکس می شود. همین روند در خصوص تغییرات ضریب توان برحسب لامبدا نیز وجود داشت. با افزایش لامبدا، مقدار ضریب توان در ابتدا بیشتر شده و سپس پس از عبور از یک بیشینه موضعی، کاهش می یابد. همچنین با توجه به این که نقاط ابتدایی پره بیشتر در معرض استال قرار دارند، بنابراین سهم کمتری در تولید توان خواهند داشت. در نتیجه انتظار می رود که بیشینه ضریب توان در نقاط انتهایی پره اتفاق بیفتد.

نمودار نیروی برآ در راستای پره برای لامبدا های مختلف در شکل ۱۸ مشاهده



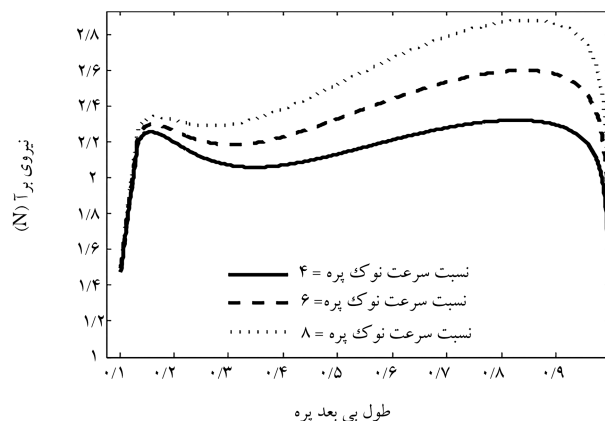
## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از هر دو روش حل عددی و حل تحلیلی به بررسی پارامتری سیستم جاذب انرژی اینولوکس پرداخته شد. در حقیقت با ایجاد یک جفت سازی خارج از خط (کوپلینگ آفلاین)، از خروجی‌های حل عددی به منظور ورودی‌های نظریه BIM استفاده شد. در ادامه نیز با احتساب هندسه سیستم جاذب انرژی باد اینولوکس مینا و با اعمال ضرایب اصلاح نوک پره و تویی پراپتل و نیز ضریب تصحیح دنباله آشفته گلوآرت، یک توربین باد مناسب جهت قرارگیری در بخش ونتوری این سیستم، طراحی شد. مهم‌ترین نتایج استخراج شده از پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

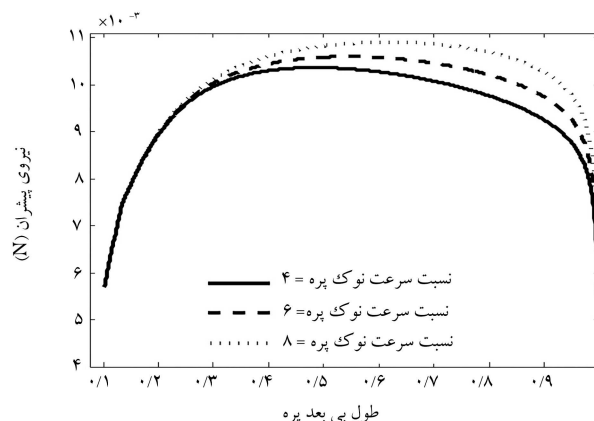
- هر دو بستر حل عددی و تحلیلی انتخابی توافق قابل توجهی با نتایج پیشین داشته و از این رو نتایج به دست آمده قابل اتکا خواهد بود؛
- با استفاده از تحلیل عددی و سه‌بعدی سیستم اینولوکس به دست آمد که سیستم اینولوکس قادر است حدوداً به میزان ۶۶ درصد سرعت جریان باد آزاد را افزایش داده و جریان با سرعت بیشتری را به پره‌های توربین باد مستقر شده در بخش ونتوری تحویل دهد؛
- در بخش تحلیلی و برای اعتبارسنجی کد نظریه BIM از ضریب تصحیح دنباله آشفته گلوآرت استفاده شده. به منظور مقایسه‌ی سایر ضرایب تصحیح با ضریب تصحیح گلوآرت و بررسی میزان دقت آن‌ها، مقایسه‌ی جامع میان ضرایب تصحیح گلوآرت و برتون صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که تصحیح برتون به نسبت تصحیح گلوآرت محافظه کارانه‌تر عمل کرده و نتایج کم‌تری از آن برای ضریب توان به دست می‌آید؛ به این صورت که تصحیح برتون در شرایط مشابه ضریب توان و لامبدای متناظر آن را به ترتیب ۰/۸۷۸ و ۰/۹۱۳ برابر کم‌تر پیش‌بینی می‌کند.

## نمادها

- $A$ : مساحت (متر مربع)؛  
 $F$ : ضریب اتلاف پراپتل؛  
 $a$ : ضریب القایی محوری؛  
 $a'$ : ضریب القایی مماسی؛  
 $C_L$ : ضریب برآ؛  
 $C_D$ : ضریب پسا؛  
 $(C_L/C_D)_{\max}$ : نسبت ضریب برآ به پسی بیشینه؛  
 $C_P$ : ضریب توان؛  
 $L$ : نیروی برآ (نیوتن)؛  
 $D$ : نیروی پسا (نیوتن)؛  
 $P$ : توان (وات)؛  
 $T$ : نیروی محوری (نیوتن)؛  
 $Q$ : گشتاور (نیوتن متر)؛  
 $U$ : سرعت سیال (متر بر ثانیه)؛  
 $R$ : شعاع روتور (متر)؛  
 $r$ : شعاع محلی (متر)؛  
 $C(r)$ : توزیع وتر در راستای پره (متر)؛



شکل ۱۸. نیروی برآ در راستای پره برای لامبدهای مختلف.



شکل ۱۹. نیروی پیشران در راستای پره برای لامبدهای مختلف.

می‌شود. نقاط ابتدایی پره در محدوده‌ی استال قرار دارند، بنابراین دور از انتظار نیست که در این نقاط نسبت به نقاط انتهایی پره نیروی برآ کم‌تر باشد. مشاهده می‌شود که در ابتدا روند نمودار صعودی است تا این که نمودار در شعاع ۰/۱۴۴۵ متر به بیشینه‌ی موضعی می‌رسد. مقدار نیروی برآ در این نقطه برابر ۲/۲۹ نیوتون است. سپس نیروی برآ به علت تغییر در روند تغییرات وتر و افزایش احتمال وقوع استال، کاهش یافته و در شعاع ۰/۲۷۹۷ به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد. که در آن نیروی برآ برابر ۲/۱۶۵ نیوتون است. در ادامه نمودار روند صعودی به خود گرفته و در شعاع ۰/۷۵۳۷ متر به بیشینه‌ی مقدار خود یعنی ۲/۵۵۲ نیوتون می‌رسد. انتظار می‌رود که نقاط ابتدایی پره در محدوده استال قرار داشته باشند، بنابراین در این نقاط نسبت به نقاط انتهایی پره نیروی پسا بیشتر و نیروی برآ کم‌تر است.

شکل ۱۹ نمودار نیروی پیشران را در راستای پره برای لامبدهای مختلف (۴، ۶ و ۸) ارائه می‌کند. در ابتدا دیده می‌شود که نیروی پیشران صعودی است و این صعود با شیب نسبتاً تندی صورت می‌گیرد که به دلیل افزایش طول وتر در نقاط ابتدایی هر پره است. نیروی پیشران پس از رسیدن به مقدار ۰/۱ نیوتون در شعاع بی‌بعد ۰/۵۰۵۶، دچار کاهش می‌شود. تغییر روند نیروی پیشران را می‌توان به تغییر روند توزیع وتر و کاهشی شدن آن نسبت داد. با انتقال‌گیری از رابطه‌ی ۸ می‌توان مقدار کل نیروی پیشران روتور را در هر لامبدایی محاسبه کرد. مثلاً در نقطه‌ی بهینه‌ی طراحی، مقدار نیروی پیشران توربین باد طراحی شده با فرض ۳ پره، ۲۱/۹۱۲ نیوتون به دست می‌آید.

$\lambda$ : نسبت سرعت نوک پره؛	$\theta_{opt}$ : زاویه‌ی پیش‌بهرینه (درجه)؛
$R_{hub}$ : شعاع توبی (متر)؛	$\phi$ : زاویه جریان (درجه)؛
$Re$ : عدد رینولدز؛	$\rho$ : چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)؛
$B$ : تعداد پره؛	$\eta$ : بازده؛
$\alpha$ : زاویه‌ی حمله (درجه)؛	$\sigma$ : ضریب استحکام یا صلبیت؛
$\theta$ : زاویه‌ی پیش (درجه)؛	$\omega$ : سرعت دورانی روتور (دور بر دقیقه).

## منابع (References)

1. Rezaey, S. "Numerical investigation of a globe control valve and estimating its loss coefficient at different opening states", *European Journal of Computational Mechanics*, **29**(4-6), pp. 549-576 (2021). DOI: <https://doi.org/10.13052/ejcm1779-7179.294610>.
2. Allaei, D. and Andreopoulos, Y. "INVELOX: a new concept in wind Energy harvesting, *Proceeding of ASME 2013 7th International Conference on energy Sustainability & 11th Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference ES-Fuel Cell*, pp. 14-19 (2013).
3. Allaei, D. and Andreopoulos, Y. "INVELOX: description of a new concept in wind power and its performance evaluation", *Energy*, **69**, pp. 336-344 (2014).
4. Allaei, D., Tarnowski, D. and Andreopoulos, Y. "INVELOX with multiple wind turbine generator systems", *Energy*, **93**, pp. 1030-1040 (2015).
5. Sedaghat, A., Waked, A., Assad, H. and et al. Analysis of accelerating devices for enclosure wind turbines. *Int. J. Astronaut. Aeronaut. Eng*, **2**(9), pp.9-23 (2017).
6. Patil, M.N., Ghadage, S.M., Gaikwad, O.R. and et al. Design and Fabrication of Invelox, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, **6**(6), pp.765-768 (2019).
7. Akour, S.N. and Bataineh, H.O. "Design considerations of wind funnel concentrator for low wind speed regions", *AIMS Energy*, **7**, pp. 728-742 (2019).
8. Solanki, A.L., Kayasth, B.D. and Bhatt, H. "Design modification & analysis for venturi section of INVELOX system to maximize power using multiple wind turbine", *Int J Innovat Res Sci Technol*, **3**, pp. 125-127 (2017).
9. Glauert, H. "The analysis of experimental results in the windmill brake and vortex ring states of an airscrew", HM Stationery Office (1926).
10. Hsiao, F.-B., Bai, C.-J. and Chong, W.-T. "The performance test of three different horizontal axis wind turbine (HAWT) blade shapes using experimental and numerical methods", *Energies*, **6** pp. 2784-2803 (2013).
11. Karimian Aliabadi, S. and Rasekh, S. "Effect of platform disturbance on the performance of offshore wind turbine under pitch control", *Wind Energy*, **23**, pp. 1210-1230 (2020).
12. Karimian, S. and Rasekh, S. "Power and noise performance assessment of a variable pitch vertical axis darrieus type wind turbine", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **43**, pp. 1-21 (2021).
13. Asghari, M., Karimian Aliabadi, S. and Hashemi, M. "Study the effect of suction flow control on the aerodynamic performance of a wind turbine using 2D section numerical results", *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, **37** pp. 79-89 (2021).
14. Tahani, M., Kavari, G., Masdari, M. and et al. "Aerodynamic design of horizontal axis wind turbine with innovative local linearization of chord and twist distributions", *Energy*, **131**, pp. 78-91 (2017).
15. Branlard, E., *Wind Turbine Aerodynamics and Vorticity-Based Methods: Fundamentals and Recent Applications*, Springer (2017).
16. Manwell, J.F., McGowan, J.G. and Rogers, A.L., *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons (2010).
17. Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D. and et al., *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons (2011).
18. SnehalNarendrabhai, P. and Desmukh, T. "Numerical simulation of flow through INVELOX wind turbine system", *International Journal of Renewable Energy Research*, **8**, pp. 291-301 (2018).
19. Tangler, J.L. and Somers, D.M. "NREL airfoil families for HAWTs", National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States) (1995).
20. <http://airfoiltools.com/airfoil/details>.