



## اصلاح پروفیل ایرفویل فن بدون پره و بررسی منحنی افزایش دبی فن

محمد جعفری<sup>۱</sup>، حسین افشین<sup>۲\*</sup> و بیژن فرهانیه<sup>۳</sup><sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۲/۱۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۱۲/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۳۰

## چکیده

در این پژوهش، ضمن معرفی پارامترهای موثر در عملکرد فن‌های بدون پره، پروفیل مقطع فن که مؤثرترین و مهم‌ترین بخش طراحی این گونه فن‌ها می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور اصلاح پروفیل مقطع فن بدون پره و نیز به دلیل شباهت زیاد این مقطع به پروفیل ایرفویل، پنج پروفیل از بین ایرفویل‌های استاندارد با در نظر گرفتن پارامترهای مهم هندسی از جمله شعاع لبه حمله و بیشینه ضخامت ایرفویل انتخاب شده است که با هندسه ایرفویل اصلی فن مطابقت خوبی داشته‌اند. همچنین پنج ایرفویل به منظور ایجاد جریان هوای یکنواخت بعد از فن و جلوگیری از جدایش جریان و با در نظر گرفتن ملاحظات ساخت، طراحی شده است. با حل معادلات پیوستگی و مومنوم برای جریان تراکم ناپذیر به کمک روش‌های عددی، جریان به صورت سه‌بعدی، مورد تحلیل قرار گرفته است. با استفاده از تحلیل‌های انجام شده، مشخصات آیرودینامیکی ایرفویل‌های طراحی شده و ایرفویل اصلی فن بدون پره ترسیم و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با مقایسه نتایج و بررسی جریان روی ایرفویل‌ها و نیز در نظر گرفتن هندسه ساده جهت ساخت فن، ایرفویل ایپلر ۴۷۳ برای طراحی فن انتخاب شده است. در ادامه با در نظر گرفتن ایرفویل ایپلر ۴۷۳، فن بدون پره با قطر ۳۰ سانتی‌متر، در اتاقکی با ابعاد ۴×۲×۲ متر به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. به کمک شبیه‌سازی انجام شده، منحنی افزایش دبی فن به ازای دبی‌های ورودی مختلف ترسیم شده است. منحنی افزایش دبی فن، نشان می‌دهد که با افزایش دبی ورودی، میزان دبی خروجی به صورت خطی افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** فن بدون پره؛ پروفیل ایرفویل؛ شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی؛ ضرایب برا و پسا.

## Airfoil Profile Reformation of Bladeless Fan and Investigation of Flow Increase Curve

M. Jafari<sup>1</sup>, H. Afshin<sup>2,\*</sup> and B. Farhanieh<sup>3</sup><sup>1</sup>M.Sc. Student, Mech. Eng., Sharif University of Technology, Tehran, Iran<sup>2</sup> Assistant Prof., Mech. Eng., Sharif University of Technology, Tehran, Iran<sup>3</sup> Professor Prof., Mech. Eng., Sharif University of Technology, Tehran, Iran

## Abstract

In the present investigation, in spite of introducing the effective parameters in the Bladeless fan performance, the profile of fan cross section was studied precisely because it is the most important section of designing this kind of fan. In order to modify the fan cross section and by considering the similarity of bladeless fans to airfoils, five profiles were chosen among the standard airfoil profiles by considering the important geometric parameters such as radius of leading edge, maximum thickness of airfoil compatible with the original airfoil. In addition, five profile were designed to create uniform airflow in front of fan and to prevent the separation of flow as well as the manufacturing criteria. By solving the momentum and continuity equations for incompressible fluid, the flow was analyzed numerically in 3D form. The aerodynamic characteristics of the designed airfoils and the original airfoil of the Bladeless fan were indicated and compared to each other. The fan was located in the center of a 4×2×2m room and Eppler473 airfoil profile was used as the cross section of this fan. According to the obtained numerical results, the flow increase curve of the fan versus different inlet flow rate was depicted. The flow increase curve shows that the outlet flow rate increased linearly by increasing the inlet flow rate.

**Keywords:** Bladeless Fan; Airfoil Profile; 3D Numerical Simulation; Drag and Lift Coefficients.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با پیشرفت سریع جوامع بشری و نیازمندی هرچه بیشتر آن‌ها به سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی، سبب شده است تا تولید انواع فن‌ها بیش از پیش مورد توجه صنعت‌گران قرارگیرد. در سال ۲۰۰۹ فن‌هایی جدید، تحت عنوان فن‌های بدون پره توسط شخصی به نام دیسون<sup>۱</sup> اختراع و به ثبت رسید. در سال ۲۰۱۰، این فن به دلیل داشتن قابلیت‌های منحصر به فرد، مورد توجه صنعت‌گران قرار گرفت، به طوری که در ابعاد کوچک و به منظور کاربردهای خانگی تولید و در سطح بازار جهانی، عرضه گردید. از جمله مزایای این فن نسبت به فن‌های [۱] دیگر می‌توان به بازده بالا، وزن کم، استهلاک کمتر، عدم وجود پره به شکل پره‌ی فن‌های قدیمی و ایمنی بسیار زیاد اشاره کرد. از جمله پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد این نمونه فن‌ها، ضخامت خروجی هوا، زاویه خروجی جریان هوا، طول محوری فن و از همه مهم‌تر، هندسه شبیه ایرفویل<sup>۲</sup> مقطع این فن است.

تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه‌های مختلف روی انواع ایرفویل‌ها و بررسی خصوصیات آیرودینامیکی آن‌ها انجام شده است که به بخشی از آن‌ها اشاره می‌شود. در سال ۲۰۰۶ کیم و همکارانش [۲]، میدان جریان پیرامون ایرفویل ناکا<sup>۳</sup> ۰۰۱۸ را در جریان یکنواخت با تولید نویز، به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، زمانیکه ایرفویل به صورت متقارن و در زوایای حمله کوچک قرار گیرد، نویزهای فرکانسی گسسته داخل جریان دیده می‌شود. در سال ۲۰۰۷ مک آرتور<sup>۴</sup> [۳]، نتایج آیرودینامیکی به دست آمده از تست تونل باد را با نتایج روش ردیابی ذرات برای ایرفویل مدل ایپلر ۳۸۷ مقایسه کرد. در سال ۲۰۰۸ یانگ و همکارانش<sup>۵</sup> [۴]، با استفاده از نتایج روش ردیابی ذرات<sup>۶</sup> به بررسی مشخصات آیرودینامیکی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲، در زاویه حمله‌های مختلف پرداختند. در سال ۲۰۱۰

سیایو و همکارانش<sup>۸</sup> [۵] حرکت انتقالی جدایش جریان پشت ایرفویل را با استفاده از تولید کننده ورتکس، در مورد یک ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ بررسی کردند. در سال ۲۰۱۰ چاندراونشی و همکارانش<sup>۹</sup> [۶]، با حل عددی جریان اطراف ایرفویل متقارن مدل ناکا ۰۰۱۲، ساختار ویک ایجاد شده را برای مقادیر دامنه و فرکانس کاهیده مختلف، مورد مطالعه قرار دادند. در سال ۲۰۱۱ بلک ول<sup>۱۰</sup> [۷]، نتایج آزمایشگاهی را با نتایج بدست آمده از روش‌های عددی روی ایرفویل مدل KLARK Y-14 مقایسه کرد. در سال ۲۰۱۲ النی و همکارانش<sup>۱۱</sup> [۸]، نتایج بدست آمده از حل عددی جریان با استفاده از مدل‌های توربولانسی مختلف را برای ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ با نتایج آزمایشگاهی آقای آبوت و همکاران<sup>۱۲</sup> مقایسه کردند؛ هرچند که تا به حال جریان روی ایرفویل‌ها از طریق روش‌های آزمایشگاهی و نیز به کمک شبیه‌سازی عددی بسیار، مورد مطالعه قرار گرفته است، ولی در این پژوهش، به منظور مقایسه مشخصات آیرودینامیکی ایرفویل‌های دیگر با ایرفویل اصلی فن بدون پره و انتخاب ایرفویل مناسب جهت طراحی فن، جریان روی ایرفویل‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به کاربرد بسیار فن‌ها در صنایع مختلف، تعداد زیادی از پژوهشگران در راستای بالابردن عملکرد فن‌های محوری و شعاعی، مطالعاتی انجام داده‌اند. از آنجا که مکانیزم عملکرد فن‌های بدون پره مشابه فن‌های شعاعی و محوری است، به بخشی از مطالعات انجام شده روی این دو دسته فن، اشاره می‌شود. واد و بنز<sup>۱۳</sup> [۹] در سال ۱۹۹۸، ساختار جریان‌های ثانویه مربوط به اعمال گردابه غیر آزاد را در فن‌های محوری، مورد مطالعه قرار دادند. لین و هانگ<sup>۱۴</sup> [۱۰] در سال ۲۰۰۲، فن‌گریز از مرکز را به صورت عددی و تجربی مورد تحلیل و آزمایش قرار دادند. آن‌ها از شبیه‌سازی عددی به عنوان ابزار برای طراحی مقطع پخش‌کننده<sup>۱۵</sup> به منظور

<sup>8</sup> Siauw et al.

<sup>9</sup> Chandravanshi et al.

<sup>10</sup> Blackwell

<sup>11</sup> Eleni et al.

<sup>12</sup> Abbott et al.

<sup>13</sup> Vad & Benzec

<sup>14</sup> Lin & Huang

<sup>15</sup> Diffuser

<sup>1</sup> Dyson

<sup>2</sup> Airfoil

<sup>3</sup> Kim et al.

<sup>4</sup> NACA

<sup>5</sup> McArthur

<sup>6</sup> Young et al.

<sup>7</sup> PIV

مختلف، مورد بررسی قرار نگرفته است. این گونه فن‌ها تنها به منظور کاربردهای خانگی و در ابعاد کوچک به قطر ۳۰ سانتی‌متر تولید شده است. تنها اطلاعاتی که در حال حاضر از این فن‌ها در دسترس است، می‌توان به مشخصات مختصر هندسی ذکر شده در اسناد مربوط به ثبت اختراع این فن‌ها اشاره کرد. در این پژوهش، علاوه بر معرفی پارامترهای موثر در عملکرد فن و آشنایی با مکانیزم ورود و خروج هوا از آن، به بررسی و اصلاح مهم‌ترین جزء این گونه فن‌ها یعنی، مقطع ایرفویل شکل به منظور استفاده صنعتی در ابعاد بزرگ، پرداخته شده است. در بخش اول این پژوهش، ابتدا هندسه ایرفویل شکل مقطع فن، اصلاح شده است و سپس با معرفی ایرفویل اپپلر<sup>۲۴</sup> ۴۷۳ به عنوان ایرفویل مناسب جهت طراحی و ساخت مقطع آن، فن بدون پره به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی و منحنی افزایش دبی آن به ازای دبی‌های ورودی مختلف، ترسیم شده است.

## ۲- مکانیزم عملکرد فن بدون پره

طراحی این گونه از فن‌ها تلفیقی از فن‌های محوری و شعاعی است و خصوصیات هر دو دسته فن‌ها را دارا هستند. مکانیزم عملکرد این گونه فن‌ها، بدین شکل است که چرخش پره‌های شعاعی، سبب مکش هوا به داخل فن می‌شود. سپس هوای ورودی با عبور از قسمت دایره‌ای دارای مقطعی ایرفویل شکل، شتاب می‌گیرد. این فن به خاطر هندسه خاصی که دارد، مانند اجکتور عمل کرده، هوای خارج شده از فن، سبب مکش هوای پشت فن و هوای اطراف فن می‌شود. حرکت مجموع جریان هوای ورودی، هوای پشت فن و هوای اطراف فن به سمت جلوی فن سبب می‌شود، دبی هوای خروجی چند برابر دبی هوای ورودی فن باشد. این افزایش دبی به واسطه مکش هوای پشت فن، از ویژگی‌های متمایز این فن نسبت به فن‌های دیگر است. در شکل ۱، مکانیزم ورود و خروج هوا از این فن به صورت شماتیک و به ترتیب نمایش داده شده است [۱].

کاهش نویز<sup>۱۶</sup> و تنظیم زاویه پره‌ها، استفاده کردند. نتایج عددی و تجربی برای همه حالات مورد بررسی، اختلاف کم‌تر از ۵/۴ درصد را نشان می‌دهد. انگین<sup>۱۷</sup> [۱۱] در سال ۲۰۰۶ با انجام شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی و پایا، به بررسی تأثیر فاصله‌ی نوک پره تا بدنه در فن‌های شعاعی بدون طوقی، با سه نوع پره بیسی<sup>۱۸</sup>، آرتی<sup>۱۹</sup> و شعاعی پرداخت. در سال ۲۰۰۹ کارانس و شارما<sup>۲۰</sup> [۱۲] مدلی دو بعدی از فن شعاعی تهیه کردند. این افراد با استفاده از تکنیک مش متحرک در شبیه‌سازی‌های انجام شده دقت حل را افزایش داده و در ضمن صحت، نتایج خود را با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، تأیید کردند.

با توجه به این که جریان داخل فن‌ها آشفته است، پژوهشگران با به‌کارگیری انواع روش‌های توربولانسی برای مدل‌سازی‌های خود و مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی، توانایی انواع مدل‌های توربولانسی را در پیش‌بینی عملکرد بهتر فن‌ها، مورد مطالعه قرار داده‌اند. در سال ۲۰۱۰ هارولت و همکارانش<sup>۲۱</sup> [۱۳] با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی روی سه مدل فن محوری، نشان دادند که مدل توربولانسی RSM جواب‌های دقیق‌تری نسبت به مدل RANS دارد. در سال ۲۰۱۱ سان و همکارانش<sup>۲۲</sup> [۱۴] مدلی جهت پیش‌بینی شروع واماندگی در فن‌های محوری با سرعت بالا ارائه کردند. آن‌ها با مقایسه نتایج عددی بدست آمده به کمک مدل شروع واماندگی<sup>۲۳</sup> با نتایج آزمایشگاهی و مطابقت آن‌ها با یکدیگر، این روش را برای پیش‌بینی واماندگی در فن‌های محوری پیشنهاد کردند. در سال ۲۰۱۳ لوو و همکارانش [۱۵]، با انجام شبیه‌سازی سه‌بعدی و تحلیل جریان داخل فن، ضمن ارائه پیشنهاداتی جهت کاهش نویز صدای ناشی از قسمت حلقوی فن شعاعی را کاهش دادند.

با توجه به این که فن‌های بدون پره در سال ۲۰۰۹ اختراع شده است، عملکرد این گونه فن‌ها به ازای شرایط

<sup>16</sup> Noise

<sup>17</sup> Engin

<sup>18</sup> BC

<sup>19</sup> RT

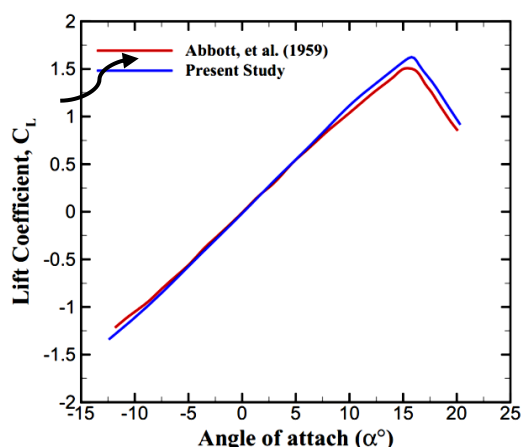
<sup>20</sup> Karanth & Sharma

<sup>21</sup> Hurault et al.

<sup>22</sup> Sun et al.

<sup>23</sup> Stall Inception Model

<sup>24</sup> EPPLER

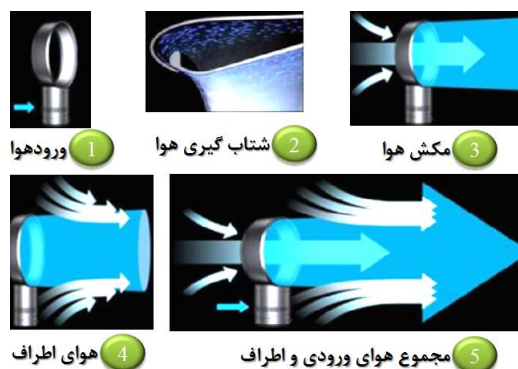


شکل ۳- نمودار ضریب برآ بر حسب زاویه حمله در رینولدز  $3.0 \times 10^6$ .

با مقایسه نمودارهای آیرودینامیکی نشان داده شده برای ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ با نتایج عددی حاضر در شکل‌های ۲ و ۳، مشاهده می‌شود نتایج عددی و تجربی، مطابقت خوبی با یکدیگر دارند.

### ۳-۲ هندسه و شبکه‌بندی

همان‌طور که در قسمت‌های قبل بیان شد، مهم‌ترین قسمت فن‌های بدون پره قسمت دایره‌ای این فن می‌باشد. با توجه به این که قسمت دایره‌ای فن مقطعی شبیه به ایرفویل دارد، بنابراین ابتدا جریان روی ایرفویل‌های طراحی شده، ایرفویل اصلی فن (مقطع در نظر گرفته شده توسط دیسون)، مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. به منظور محاسبه مشخصات آیرودینامیکی ایرفویل‌های طراحی شده از جمله، نسبت ضریب برآ به ضریب پسا و ضریب برآ در زاویه حمله‌های مختلف، شبیه‌سازی مطابق شکل ۴ صورت گرفته است.

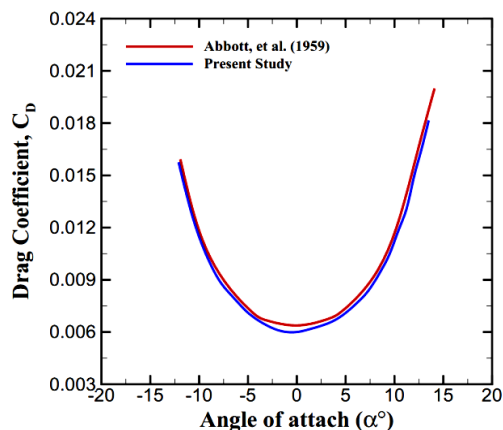


شکل ۱- مکانیزم ورود و خروج هوا از فن بدون پره.

### ۳-۱ اصلاح پروفیل ایرفویل فن بدون پره

#### ۳-۱-۱ اعتبارسنجی

به منظور اطمینان از نتایج بدست آمده از حل عددی، ابتدا میدان جریان روی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ مدل‌سازی شده است. نمودارهای ضریب برآ<sup>۲۵</sup> و ضریب پسا<sup>۲۶</sup> بر حسب زاویه حمله در عدد رینولدز  $3.0 \times 10^6$  در شکل‌های ۲ و ۳ ترسیم و با نتایج آزمایشگاهی آبوت و همکارانش<sup>۲۷</sup> مقایسه شده است [۱۶].



شکل ۲- نمودار ضریب پسا بر حسب زاویه حمله در رینولدز  $3.0 \times 10^6$ .

<sup>25</sup> Lift Coefficient

<sup>26</sup> Drag Coefficient

<sup>27</sup> Abbott et al.

### ۳-۳ شرایط مرزی و معادلات حاکم

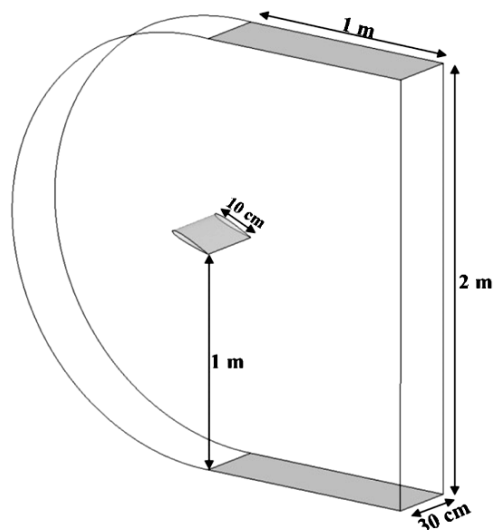
در شکل ۵، علاوه بر نمایش مش‌بندی ناحیه اطراف ایرفویل، شرایط مرزی اعمال شده برای حل جریان، نشان داده شده است. شرط مرزی ورودی به صورت سرعت ثابت برابر ۱۰ متر بر ثانیه و در خروجی شرط فشار نسبی صفر، در نظر گرفته شده است. برای حل جریان سیال هوا در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. چگالی ( $\rho$ ) هوا  $1/204 \text{ kg/m}^3$  و ویسکوزیته ( $\mu$ ) آن  $1/82 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  در نظر گرفته شده‌است.

با توجه به این که عدد رینولدز جریان در حدود ۱۰۰۰۰۰ است جریان هوای عبوری از روی ایرفویل به صورت آشفتگی در نظر گرفته شده است بنابراین از مدل توربولانسی  $k-\epsilon$  استاندارد، جهت حل جریان استفاده شده است. به منظور حل جریان اطراف ایرفویل، معادلات پیوستگی و مومنتوم برای سیال تراکم ناپذیر، گسسته و به صورت عددی حل گردیده است. گسسته سازی معادلات به روش بادسو<sup>۲۸</sup> با دقت مرتبه دو و از الگوریتم سیمپل<sup>۲۹</sup> برای حل معادلات حاکم بر جریان استفاده شده است. لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر، برای حل معادلات حاکم، از نرم‌افزار تجاری انسیس سی اف ایکس<sup>۳۰</sup> استفاده شده است.

### ۳-۴ پروفیل‌های مورد مطالعه

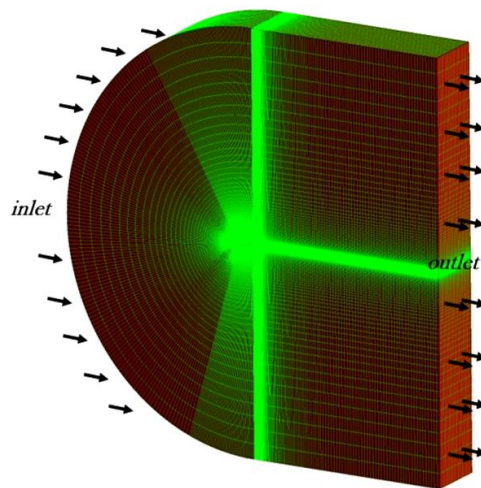
در این قسمت، ابتدا با توجه به اطلاعات ذکر شده در اسناد مربوط به ثبت اختراع فن اصلی، به طور مختصر مشخصات مقطع ایرفویل شکل این فن بیان می‌شود [۱]. در شکل ۶، پروفیل ایرفویل اصلی فن، به همراه اندازه قسمت‌های مختلف آن نمایش داده شده است. مشخصات هندسی این ایرفویل عبارتند از:

- طول ایرفویل برابر ۱۰ سانتی‌متر
- بیشینه ضخامت ایرفویل ۲۰ درصد طول ایرفویل
- بیشینه ضخامت در فاصله ۲ سانتی‌متری از لبه ابتدایی
- زاویه حمله ایرفویل حدود ۱۶ درجه
- اندازه مقطع خروجی جریان هوا حدود ۱ میلی‌متر



شکل ۴- شماتیک هندسه شبیه‌سازی شده.

فاصله دیواره‌های اطراف ایرفویل، ۱۰ برابر طول ایرفویل در نظر گرفته شده است تا تأثیر دیواره‌ها بر حل جریان اطراف ایرفویل ناچیز گردد [۸]. پس از شبیه‌سازی ایرفویل‌ها جهت حل جریان اطراف ایرفویل‌ها، هندسه شکل ۴ به صورت سازمان یافته مش‌بندی شده است. در شکل ۵، مش‌بندی ناحیه اطراف ایرفویل نمایش داده شده است.



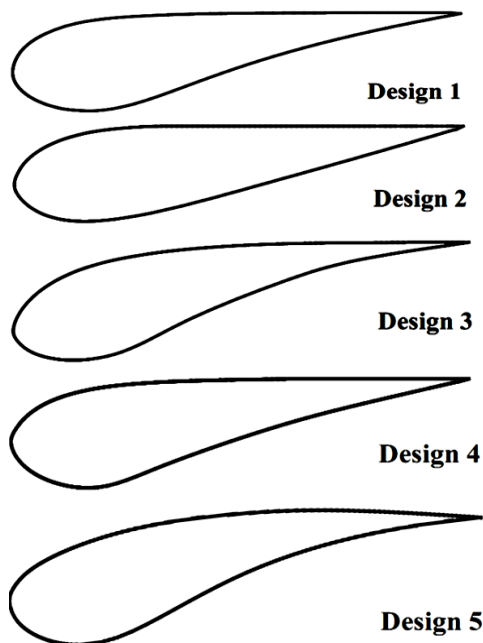
شکل ۵- شبکه‌بندی هندسه ایرفویل و شرایط مرزی.

<sup>28</sup> Upwind

<sup>29</sup> SIMPLE

<sup>30</sup> Ansys CFX

سطح زیر ایرفویل‌ها به صورت انحنادار طراحی شده است تا اثر کواندا افکت<sup>۳۱</sup> که یکی از مهم‌ترین عوامل مکش هوای پشت فن است، به طور قابل توجهی افزایش یابد.

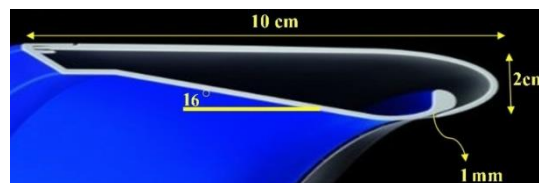


شکل ۷- شماتیک هندسه ایرفویل‌های طراحی شده.

### ۳-۵ تحلیل ایرفویل‌ها و بررسی نتایج

با مقایسه کردن ایرفویل‌های استاندارد انتخاب شده و ایرفویل‌های طراحی شده در ابعاد ایرفویل اصلی فن بدون پره، مجموع ۱۰ ایرفویل به همراه ایرفویل اصلی، مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مقایسه ضریب برا و نسبت ضریب برا به ضریب پسا در زاویه حمله‌های مختلف، تحلیل‌های انجام شده روی ایرفویل‌ها در رینولدز ۱۰۰۰۰۰ صورت گرفته است. در شکل‌های ۸ و ۹، نمودارهای آیرودینامیکی ایرفویل اصلی و ایرفویل‌های طراحی شده، برای عدد رینولدز ۱۰۰۰۰۰ نمایش داده است.

نتایج شکل‌های ۸ و ۹، نشان می‌دهد که ایرفویل اصلی، دارای ضریب برای پایین نسبت به بقیه ایرفویل‌ها است. در این نمودارها دیده می‌شود که تعدادی از ایرفویل‌ها مانند، ایرفویل ۶۲۶ GOE دارای ضریب برای بالا هستند؛ هرچند



شکل ۶- ابعاد ایرفویل اصلی فن بدون پره.

به منظور اصلاح مقطع فن بدون پره که شباهت زیادی به پروفیل ایرفویل دارد، پنج پروفیل از بین ایرفویل‌های استاندارد که به پروفیل ایرفویل اصلی فن شباهت هندسی بیشتری داشته‌اند، انتخاب شده است. همچنین با در نظر گرفتن پارامترهای مهم هندسی از جمله، بیشینه ضخامت ایرفویل، شعاع لبه حمله و پروفیل ابتدایی و انتهایی ایرفویل فن اصلی، پنج ایرفویل دیگر نیز طراحی شده است؛ بنابراین در مطالعه حاضر در مجموع، ۱۰ پروفیل اصلاحی پیشنهاد شده است.

هدف از انجام این کار، این است که نمودارهای ضریب برا و ضریب پسا در زوایای حمله مختلف، برای ایرفویل‌ها محاسبه و با ایرفویل اصلی فن مقایسه گردند. هرچقدر میزان نیروی اعمالی به ایرفویل بیشتر باشد، سرعت خروجی هوا از فن بیشتر می‌شود؛ بنابراین بهتر است ایرفویل‌هایی با ضریب برای بالا و ضریب پسای پایین، برای فن بدون پره انتخاب شود تا دبی خروجی فن بیشتر شود. اسامی پنج ایرفویل استاندارد انتخاب شده در جدول ۱ آورده شده است.

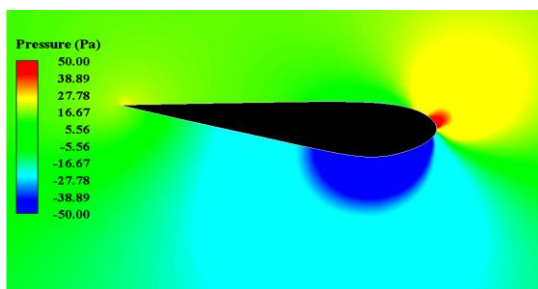
جدول ۱- اسامی ایرفویل‌های انتخاب شده.

مدل ایرفویل	ردیف
CAP 21 (TraCFoil)	۱
AH 81-K-144 W-F Klappe	۲
GOE 626	۳
EPPLER 473	۴
EPPLER E1212MOD	۵

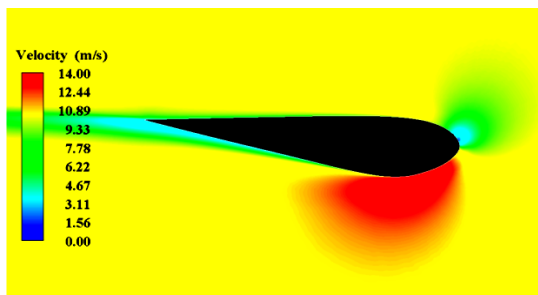
در شکل ۷ پروفیل پنج ایرفویل طراحی شده، به ترتیب نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل ایرفویل‌ها مشخص است، سطح بالای ایرفویل‌ها به صورت صاف طراحی شده است تا جریان خروجی از فن یکنواخت شود.

<sup>31</sup>CoandaEffect

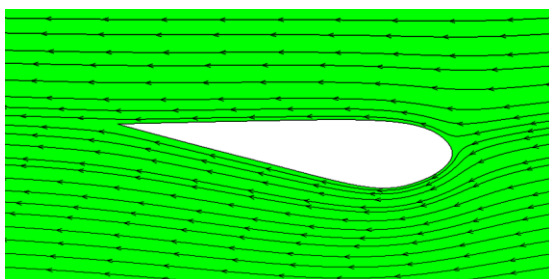
توزیع سرعت، فشار و خط مسیر جریان هوا برای ایرفویل اصلی و ایرفویل اپیپلر ۴۷۳ در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ نمایش داده شده است. باید یادآور شد که از آوردن تصاویر چگونگی توزیع سرعت و فشار برای بقیه ایرفویل‌ها خودداری شده است. شکل‌های ۱۱، ۱۰ و ۱۲ تصاویر توزیع فشار، سرعت و خطوط مسیر جریان هوا اطراف ایرفویل اصلی فن و شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ تصاویر مربوط به ایرفویل اپیپلر ۴۷۳ را نشان می‌دهند. با مقایسه تصاویر توزیع سرعت و فشار ایرفویل اپیپلر ۴۷۳ و ایرفویل اصلی فن، به خوبی دیده می‌شود که پروفیل اصلاح شده سبب ایجاد میدان سرعت ملایم‌تر و جریان یکنواخت‌تر نسبت به پروفیل اصلی فن، در سطح فشاری ایرفویل می‌شود.



شکل ۱۰- تصاویر توزیع فشار ایرفویل فن بدون پره.

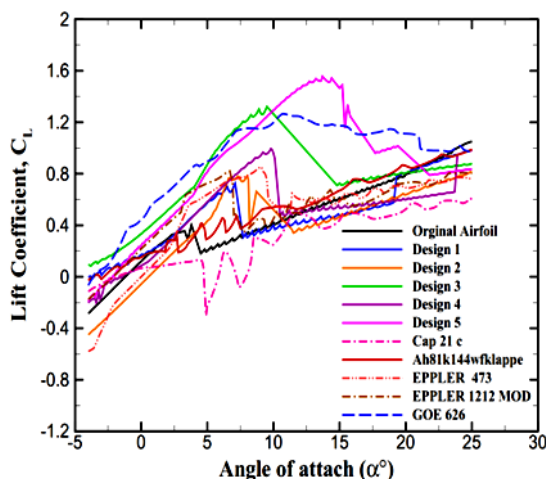


شکل ۱۱- تصاویر توزیع سرعت ایرفویل فن بدون پره.

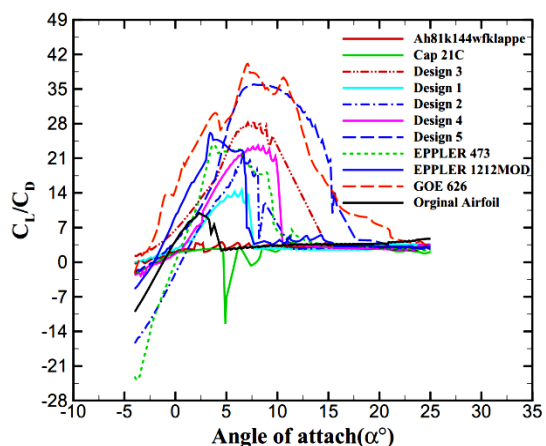


شکل ۱۲- خطوط جریان اطراف ایرفویل فن بدون پره.

این ایرفویل‌ها دارای ضریب برای بالا نسبت به بقیه ایرفویل‌ها هستند، ولی به دلیل ایجاد جریان چرخشی در زوایای حمله بالا، ایجاد جریان غیریکنواخت بعد از فن و همچنین هندسه مشکل جهت ساخت، برای طراحی این فن مناسب نمی‌باشند.



شکل ۸- نمودار نسبت ضریب برا به پسا بر حسب زاویه حمله.



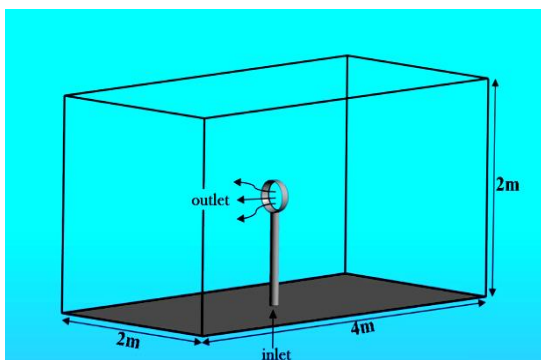
شکل ۹- نمودار ضریب برا بر حسب زاویه حمله‌های مختلف.

با در نظر گرفتن پارامترهایی برای انتخاب پروفیل ایرفویل فن، از جمله داشتن ایرفویلی با ضریب پسای پایین و ضریب برای بالا، جلوگیری از ایجاد گردابه در پشت فن و تلفات انرژی، خروج جریان از فن به صورت مستقیم، توانایی ساخت با هزینه کم و داشتن هندسه ساده، ایرفویل اپیپلر ۴۷۳ برای فن بدون پره، در نظر گرفته شده است. تصاویر

#### ۴- مدل‌سازی سه‌بعدی فن بدون پره

##### ۴-۱ هندسه و شرایط مرزی

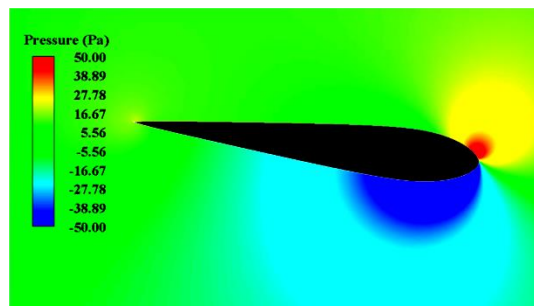
به منظور تحلیل سه‌بعدی جریان سیال گذرنده از فن هندسه فن با قطر ۳۰ سانتی‌متر، درون اتاقکی به ابعاد  $4 \times 2 \times 2$  متر مطابق شکل ۱۶ مدل‌سازی شده است. همان‌طور که در شکل ۱۶ نمایش داده شده است، هوا از قسمت پایین (قسمت استوانه‌ای شکل) وارد فن شده با عبور از قسمت دایره‌ای شکل از مقطعی با ضخامت ۱ میلی‌متر وارد اتاقک می‌شود. هوا با سرعت از فن خارج شده سبب اختلاف فشار بین ناحیه جلویی و پشت فن می‌شود. اختلاف فشار به وجود آمده، سبب مکش هوای پشت فن به سمت جلوی آن می‌شود و مکش هوا سبب حرکت هوای اطراف فن به سمت جلوی این فن می‌شود. لازم به ذکر است که قسم پره‌های ناحیه مکش هوا که در قسمت پایین فن می‌باشند، شبیه‌سازی نشده است.



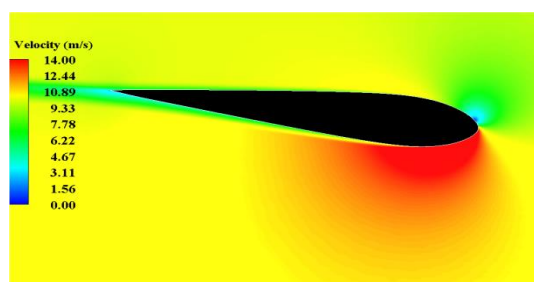
شکل ۱۶- مدل‌سازی سه‌بعدی فن درون اتاقک.

##### ۴-۲ بررسی استقلال حل از شبکه

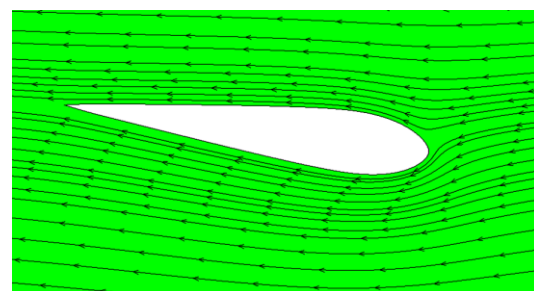
به منظور تحلیل جریان عبوری از فن، شبکه‌بندی غیر سازمان یافته برای مش‌بندی فن و اتاقک به کار گرفته شده است که دلیل انتخاب این نوع شبکه‌بندی، پیچیدگی‌های هندسی مربوط به این نوع فن می‌باشد. در شکل ۱۷، هندسه فن با شبکه‌بندی غیر سازمان یافته به همراه اتاقک نمایش داده شده است.



شکل ۱۳- تصویر توزیع فشار ایرفویل ایپلر ۴۷۳.



شکل ۱۴- تصویر توزیع سرعت ایرفویل ایپلر ۴۷۳.

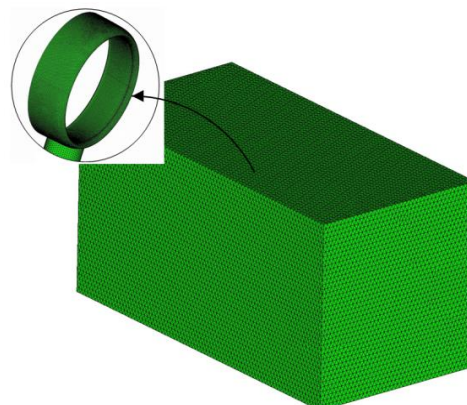


شکل ۱۵- خطوط جریان اطراف ایرفویل ایپلر ۴۷۳.

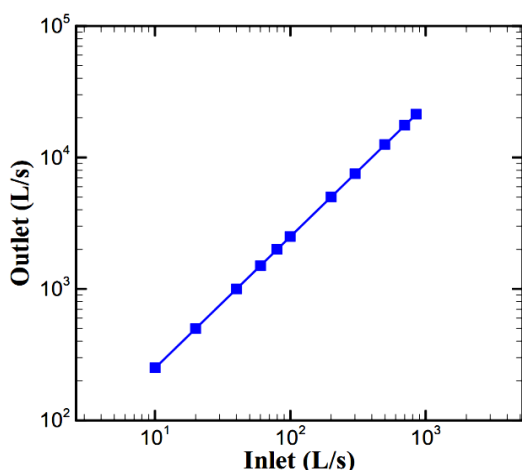
همچنین پروفیل ایپلر ۴۷۳، دارای انحنای کمتری در سطح فشاری ایرفویل، نسبت به پروفیل اصلی فن است که از جدایش سریع جریان در قسمت ابتدایی و تشکیل گردابه پس از فن، جلوگیری می‌کند. با مقایسه نتایج شکل‌های ۸ و ۹، مبنی بر ایجاد نیروی برا و پسا بیشتر در زاویه حمله‌های مختلف توسط ایرفویل ایپلر ۴۷۳ نسبت به ایرفویل اصلی و نیز در نظر گرفتن هندسه ساده آن برای ساخت فن، انتخاب پروفیل ایپلر ۴۷۳ برای طراحی فن بسیار مناسب‌تر از ایرفویل اصلی می‌باشد.



بدست آمده است. فاصله اندازه‌گیری دبی خروجی از فن منطبق بر فاصله ذکر شده برای اندازه‌گیری دبی خروجی از فن اصلی است [۱]. منحنی افزایش دبی فن که در آن دبی حجمی خروجی برحسب دبی حجمی ورودی است، در شکل ۱۹ نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۹ مشخص است، رابطه دبی خروجی با دبی ورودی به صورت خطی می‌باشد. با استفاده از رابطه (۱) می‌توان مقدار  $M$  را که برابر نسبت دبی خروجی فن به دبی ورودی آن است، محاسبه کرد. با استفاده از این رابطه مقدار  $M$  برابر ۲۵ بدست می‌آید.



شکل ۱۷- شبکه‌بندی سه‌بعدی فن و اتاقک.

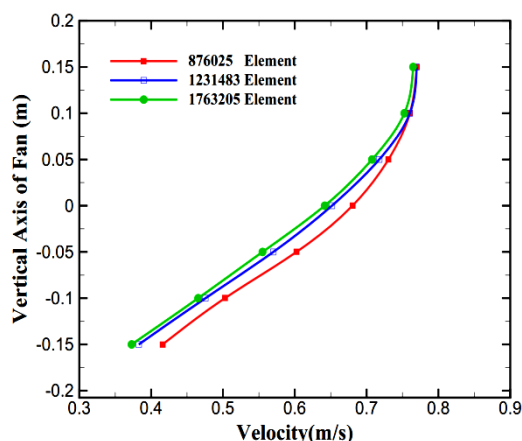


شکل ۱۹- منحنی افزایش دبی فن بدون پره با قطر ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت خروجی ۱ میلی‌متر.

$$M = \frac{\text{دبی خروجی}}{\text{دبی ورودی}} \quad (1)$$

بنابراین با توجه به منحنی افزایش دبی فن بدون پره با این مشخصات هندسی، در این فن‌ها میزان دبی خروجی در حدود ۲۵ برابر دبی ورودی است. این مقدار افزایش دبی، سبب می‌شود به ازای میزان انرژی مصرفی کمتر، دبی خروجی مورد نیاز فراهم شود که از جمله ویژگی‌های منحصر به فرد این فن است. خطوط مسیر جریان هوای گذرنده از فن و تصویر توزیع رنگی بردارهای سرعت به ازای دبی ورودی ۳۰ لیتر بر ثانیه در صفحه گذرنده از وسط فن در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نمایش داده شده است.

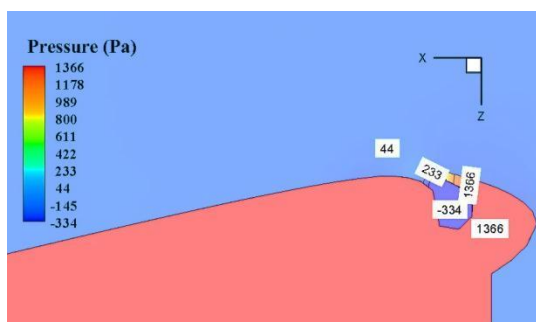
برای بررسی مستقل بودن حل‌های بدست آمده از شبکه‌بندی هندسه، فن و اتاقک اطراف آن در ۳ شبکه‌بندی مختلف طراحی و تحلیل شده است. به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، پروفیل سرعت هوای خروجی از فن در فاصله ۵۰ سانتی‌متری مقابل فن، مدنظر قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌های انجام شده برای شبکه‌بندی با تعداد المان‌های مختلف، در شکل ۱۸ نمایش داده شده است. با مقایسه نمودارها و نزدیکی جواب‌های بدست آمده برای پروفیل سرعت، تعداد المان  $10^6 \times 1/2$  برای شبکه‌بندی فن در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۸- نمودار بررسی استقلال حل از شبکه.

#### ۳-۴ نتایج

با استفاده از تحلیل‌های انجام شده دبی خروجی از فن در فاصله ۳D از فن، اندازه‌گیری و منحنی افزایش دبی فن



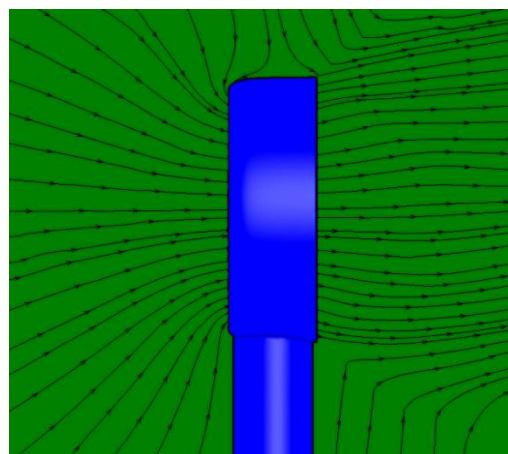
شکل ۲۲- تصویر توزیع فشار در ناحیه خروجی.

در شکل ۲۲، تصویر چگونگی توزیع فشار در صفحه میانی فن و در ناحیه خروجی از فن نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، بیشترین تغییرات فشار در ناحیه خروجی از فن دیده می‌شود که تغییر ضخامت به طور ناگهانی رخ می‌دهد. با توجه به اینکه جریان عبوری از ناحیه داخلی فن، به صورت یکنواخت است، دارای توزیع فشار تقریباً یکنواختی در قسمت بیرونی فن مشاهده می‌شود.

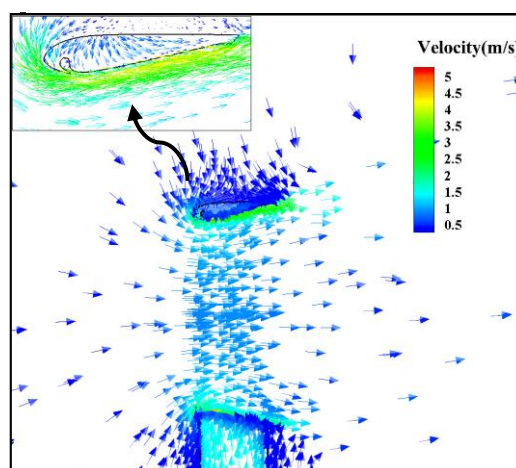
#### ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، ابتدا مشخصات آیرودینامیکی ایرفویل‌های پیشنهاد شده و ایرفویل اصلی فن پره به روش عددی محاسبه گردید. با مقایسه نتایج بدست آمده برای ۱۰ پروفیل پیشنهادی و نیز در نظر گرفتن ملاحظات ساخت، پروفیل ایرفویل اپیپلر ۴۷۳ انتخاب گردید. در ادامه با مدل‌سازی سه‌بعدی یک فن با قطر ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت خروجی ۱ میلی‌متر، منحنی افزایش دبی فن بدست آمد.

از نتایج بیان شده در بخش‌های قبل، نتیجه گرفته می‌شود که پروفیل اپیپلر ۴۷۳ علاوه بر مشخصات آیرودینامیکی مناسب، دارای هندسه ساده جهت ساخت فن است؛ بنابراین استفاده از ایرفویل اپیپلر ۴۷۳ برای طراحی این فن‌ها به منظور عملکرد بهتر و ایجاد جریان یکنواخت‌تر نسبت به فن اصلی، توصیه می‌شود. منحنی افزایش دبی این فن نیز نشان می‌دهد که رابطه بین دبی ورودی فن با دبی خروجی به صورت خطی است و میزان دبی خروجی از فن، ۲۵ برابر دبی هوای ورودی از فن است. افزایش ۲۵ برابری دبی ورودی، سبب کاهش میزان انرژی مصرفی و در نتیجه افزایش بازده فن می‌شود. از جمله موارد دیگر که از تصویر بردارهای سرعت می‌توان نتیجه گرفت، این است که توزیع



شکل ۲۰- خطوط مسیر جریان هوا در اطراف فن.



شکل ۲۱- تصویر بردارهای سرعت هوای خروجی از فن دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه،  $D=30$  سانتی‌متر.

با توجه به تصویر بردارهای سرعت نشان داده شده در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود که سرعت خروجی جریان هوا از فن در حدود ۴ متر بر ثانیه است. سرعت کم هوای خروجی از فن سبب احساس وزش باد ملایم در جلوی فن می‌شود. پروفیل سرعت در شکل ۱۸ و بردارهای سرعت در شکل ۲۱، نشان می‌دهد که سرعت خروج جریان هوا در قسمت بالای فن، نسبت به قسمت پایین آن بیشتر است. دلیل این پدیده فیزیکی، این است که با شتاب‌گیری جریان هوا در طول مقطع دایره‌ای شکل، سرعت جریان هوا افزایش می‌یابد، همین عامل سبب افزایش سرعت هوا در خروجی قسمت بالای فن، نسبت به قسمت پایین فن می‌شود.

- [5] Siau WL, Bonnet JP, Tensi J, Cordier L, Noack BR, Cattafesta L (2010) Transient dynamics of the flow around a NACA 0015 airfoil using fluidic vortex generators. *Int J Heat Fluid Fl* 31(3): 450-459.
- [6] Chandravanshi LK, Chajjed S, Sarkar S (2010) Study of wake pattern behind an oscillating airfoil. *Proceeding of the 37th National & 4th International Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power*, December 16-18: india.
- [7] Blackwell TJ (2011) Subsonic wind-tunnel wall corrections on a wing with a clark y-14 airfoil, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, San Jose State University, M.Sc. Thesis.
- [8] Eleni DC, Athanasios TI, Dionissios MP (2012) Evaluation of the turbulence models for the simulation of the flow over a national advisory committee for aeronautics (NACA) 0012 airfoil. *Journal of Mechanical Engineering Research* 4(3):100-111.
- [9] Vad J, Bencze F (1998) Three-dimensional flow in axial flow fans of non-free vortex design. *Int J Heat Fluid Fl* 19(6): 601-607.
- [10] Lin SC, Huang CL (2002) An Integrated experimental and numerical study of forward-curved centrifugal fan. *Exp Therm Fluid Sci* 26(5): 421-434.
- [11] Engin, T (2006) Study of tip clearance effects in centrifugal fans with unshrouded impellers using computational fluid dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 220(6): 599-610.
- [12] Karanth KV, Sharma NY (2008) CFD analysis of a centrifugal fan for performance enhancement using converging boundary layer suction slots. *World academy of science, Engineering and Technology*, 224(8): 1665-1678.
- [13] Hurault J, Kouidri S, Bakir F, Rey R (2010) Experimental and numerical study of the sweep effect on three-dimensional flow downstream of axial flow fans. *Flow Meas Instrum* 21(2): 155-165.
- [14] Sun X, Sun D, Yu W (2011) A model to predict stall inception of transonic axial flow fan/compressors. *Chin J Aeronaut* 24(6): 687-700.
- [15] Lu FA, Qi DT, Wang XJ, Zhou Z, Zhou HH (2012) A numerical optimization on the vibroacoustics of a centrifugal fan volute. *J Sound Vib* 331(10): 2365-2385.
- [16] Abbott IH, Von Doenhoff AE (1959) *Theory of wing sections: including a summary of airfoil data*. Dover publications.

سرعت در خروجی فن یکنواخت نیست و در قسمت‌های بالای فن، سرعت خروجی هوا نسبت به پایین بیشتر (در حدود ۲/۵ متر بر ثانیه) است. البته به دلیل اینکه اختلاف سرعت بالا و پایین فن کم است، تأثیر زیادی روی جریان نمی‌گذارد و جریان خروجی کاملاً یکنواخت (در حدود ۱ متر بر ثانیه) است.

#### ۶- فهرست علائم

قطر فن بدون پره بر حسب سانتی‌متر	$D$
ضریب نیروی پسا	$C_D$
ضریب نیروی برا	$C_L$
واحد زمان بر حسب ثانیه	$s$
واحد حجم بر حسب لیتر	$L$
واحد طول بر حسب متر	$m$
ضریب بدون بعد افزایشنده دبی فن بدون پره	$M$

#### علائم یونانی

ویسکوزیته، $Pa.s$	$\mu$
چگالی، $kg / s$	$\rho$
زاویه حمله بر حسب درجه	$\alpha$

#### ۷- مراجع

- [1] Gammack PD, Dyson J, Smith AG, Brough IJ, Teyu MS, Mohd SN (2012) European Patent No. EP 2518325. Munich, Germany: European Patent Office.
- [2] Kim HJ, S Lee N, Fujisawa (2006) Computation of unsteady flow and aerodynamic noise of NACA0018 airfoil using large-eddy simulation. *Int J Heat Fluid Fl* 27(2): 229-242.
- [3] McArthur J (2007) Aerodynamics of Wings at Low Reynolds Numbers. Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Southern California, PH.D Thesis.
- [4] Young J, Lai JC, Platzer MF, Srinivas K, Freymuth P, Koochesfahani MM, Triantafyllou MS (2004) Oscillation frequency and amplitude effects on the wake of a plunging airfoil. *AIAA journal* 42(10): 2042-2052.