

International Association of Theoretical and Applied Mechanics
I. A. OF THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS
ORGANIZATION

هجدهمین کنفرانس دینامیک شماره‌ها
18th Fluid Dynamics Conference

باسم تعالی
کتابی ارائه مقاله

هجدهمین کنفرانس دینامیک شماره‌ها
۲۴ تا ۲۸ شهریور ۱۳۹۸ در دانشگاه فردوسی مشهد ارائه شده است.

توسط نویسندگان
حسن ابوالقاسمی گل افشانی، احسان روحی

بدينوسيله گواهي مي‌شود كه مقاله با عنوان

دکتر محمد یازمان
دکتر کنفرانس

کنفرانس دینامیک شماره‌ها

انستیتو پژوهش‌های نوین
مشهد

بررسی عددی و پارامتری مولد گردابه زیر لایه مرزی بر روی ایرفویل ناکا ۲۴۱۲

دکتر احسان روحی

دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی
e.roohi@um.ac.ir

حسن ابوالقاسمی گل افشانی

دانشجوی کارشناسی ارشد هوافضا دانشگاه فردوسی
hasan.abolghasemi@mail.um.ac.ir

چکیده

در این پژوهش به بررسی اثر مولد گردابه^۱ زیر لایه مرزی در جریان کم سرعت پرداخته شده است. مولد گردابه به منظور افزایش نیروی برآ، کاهش نیروی پسا و به تاخیر انداختن جدایش جریان بر روی ایرفویل ناکا ۲۴۱۲ استفاده می‌شود. مولد گردابه استفاده شده در این پژوهش به شکل یک گوه پیشرو با مشخصات ارتفاع h ، طول $1.0h$ و عرض $0.5h$ می‌باشد. محل قرار گرفتن مولد گردابه در ۲۵ درصد طول وتر انتخاب شده تا در بالادست نقطه جدایش جریان در بیشترین زاویه حمله ممکن که ۱۷ درجه می‌باشد، قرار بگیرد. همچنین در این پژوهش ارتفاعی مناسب برای مولد گردابه مورد نظر براساس ضخامت لایه مرزی بدست آمده که برابر با ضخامت لایه مرزی می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که استفاده از مولد گردابه باعث افزایش نیروی برآ و کاهش نیروی پسا می‌شود. همچنین جدایش جریان را به طور قابل ملاحظه‌ای به تعویق می‌اندازد. این مزیت در زاویه حمله ۱۷ درجه بسیار قابل ملاحظه است چون مشخصات مبدل گردابه براساس ضخامت لایه مرزی قبل از نقطه جدایش جریان در این زاویه بنا شده است.

کلمات کلیدی: مولد گردابه، نقطه جدایش جریان، برآ، پسا

فهرست علائم

انتقال تنش برشی	SST	زمان	t	ارتفاع مولد گردابه	h
انرژی جنبشی آشفتگی	K	چشمه حرارتی	Q	مختصات دکارتی	y,x
انرژی درونی	e	سرعت	V	فشار	P
چگالی	ρ	لزجت سینماتیکی آشفته	ω	علائم یونانی	
				تانسور تنش	τ

۱- مقدمه

جریان جدا شده بر روی بال سبب اتلاف زیاد انرژی، کاهش نیروی برآ و افزایش نیروی پسا می‌شود. به همین دلیل کنترل جریان جدا شده برای بسیاری از کاربردهای سیالاتی مهم است. مولدهای گردابه یکی از راه‌حل‌های عملی برای کنترل جریان جدا شده می‌باشد که نخستین بار توسط تیلور^۲ در اواخر دهه ۱۹۴۰ پیشنهاد و معرفی شدند [۱]. مولد گردابه با ایجاد اغتشاش و انتقال انرژی جنبشی در لایه مرزی و اختلاط جریان لایه مرزی با جریان آزاد سبب آشفتگی شدن جریان لایه مرزی و به تاخیر انداختن جدایش می‌شود [۲].

لین^۳ انواع مولد گردابه زیر لایه مرزی (گوه پیشرو^۴، گوه پسرو^۵، تک پره^۶ و پره ضد چرخش^۷) را مورد بررسی قرار داد [۱].

1 . Vortex generator
2 . Taylor
3 . Lin
4 . Forwards wedge
5 . Backwards wedge
6 . Single vane
7 . Counter-rotating vanes

مولد گردابه مورد نظر در این پژوهش، گوه پیشرو با مشخصات ارتفاع h ، طول $1.0h$ و عرض $0.5h$ (شکل ۱a) می‌باشد. این گونه از مولدها برای اولین بار توسط گروس^۸ در سال ۱۹۵۴ به عنوان مولدهای گردابه گوه‌ای پیشنهاد شده است [۳]. تا کنون پژوهش‌های بسیار کمی بروی این نوع مولد گردابه به خصوص در جریان سرعت کم با رینولدز پایین انجام شده است. آشیل^۹ و همکاران به بررسی جریان و قدرت گردابه بر روی ایرفویل گذر صوتی RAE۵۲۴۳ با مولد گردابه گوه پیشرو پرداختند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از این مولد گردابه در ماخ ۰.۷، نسبت نیروی برآ به پسا را ۵ درصد افزایش می‌دهد. همچنین بیان کرده‌اند که شبیه سازی عددی نسبت به داده‌های تجربی ۲۰ درصد خطا دارد [۲]. آشیل و همکاران در پژوهشی دیگر، جریان بر روی یک صفحه تخت به همراه انواع مولد گردابه که مولد گوه پیشرو را هم شامل می‌شد از لحاظ قدرت گردابه و نیروی پسا مورد بررسی قرار دادند که شاهد کاهش نیروی پسا بوده‌اند همچنین مشاهده کردند قدرت گردابه تولید شده در نوع گوه پیشرو کمتر از نوع دیگر مولد گردابه بود اما مانند دیگر مولدها تاثیر خوبی در کاهش پسا دارد [۴].

چاوز^{۱۰} و همکاران اثر ارتفاع و فاصله از نقطه جدایش جریان را برای یک مولد گردابه پیشرو بر روی فلپ هواپیمای مدل بررسی کردند. ارتفاع بهینه برای مولد گردابه برابر با ضخامت لایه مرزی و مکان بهینه در 0.31 طول فلپ بدست آمد [۵]. در این پژوهش به بررسی عددی و پارامتری مولد گردابه زیر لایه مرزی گوه پیشرو بر روی ایرفویل ناکا ۲۴۱۲ با نرم افزار فلوئنت و با مدل لزجت $K-\omega(SST)$ پرداخته شده است. در ابتدا ارتفاع مناسب برای مولد گردابه از میان چند گزینه برای زاویه ۱۷ درجه براساس ضخامت لایه مرزی در ۲۵ درصد طول ایرفویل و سپس ضرائب نیروهای برآ و پسا برای تمام زوایا بدست آمد.

۲- روند پژوهش

در این پژوهش در ابتدا معادلات حاکم، هندسه، شرایط جریان، شبکه بندی و شرایط مرزی معرفی می‌شوند تا فیزیک جریان و مساله مشخص شوند سپس با بیان استقلال نتایج از حل عددی و اعتبار نتایج به مسئله اصلی پژوهش پرداخته می‌شود. در قسمت اصلی پژوهش ابتدا نتایج عددی (ضرائب نیروهای برآ و پسا در همه زوایا، تعیین نقطه جدایش جریان و ضخامت لایه مرزی در ۲۵ درصد طول وتر و مشخصات جریان برای زاویه ۱۷ درجه) برای ایرفویل ناکا ۲۴۱۲ بدون مولد گردابه استخراج شد. سپس برای زاویه حمله ۱۷ درجه که بیشترین ضریب نیروی برآ را دارد، ارتفاع مناسب برای مولد گردابه بدست آمده و در نهایت با هندسه نهایی مولد گردابه ضرائب نیروهای برآ و پسا برای تمامی زوایا محاسبه می‌گردد. همچنین تاثیر مولد گردابه بر جریان اطراف ایرفویل بررسی می‌شود.

۲-۱- معادلات حاکم

جریانی که در آن مولد گردابه را بررسی می‌شود، جریانی لزج و ممکن است مقداری قابل تراکم باشد. معادلاتی که در راستای حل فیزیک جریان استفاده شده عبارت‌اند از [۶،۷]:

معادله بقا جرم

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

معادله بقا ممنتوم

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) \quad (2)$$

معادله بقا انرژی

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e + p) \vec{V} = \nabla \cdot (\vec{V} \cdot \vec{\tau} + Q) \quad (3)$$

معادلات ω و k

⁸ . GROSE

⁹ . Ashill

¹⁰ . Chavez

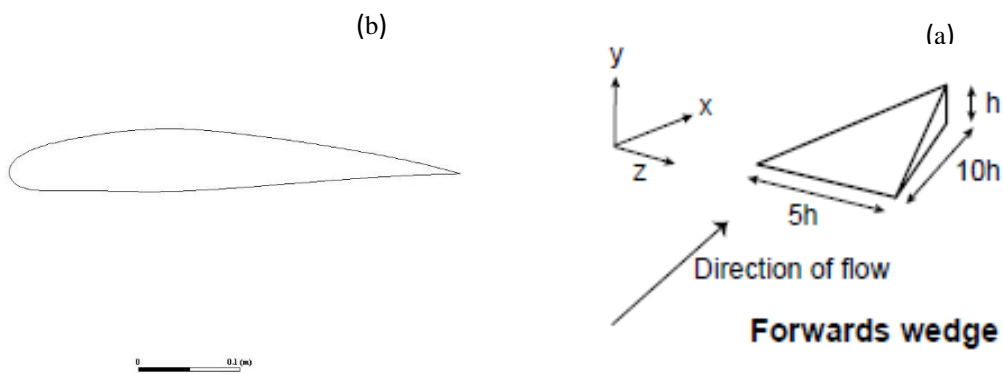
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega v_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (5)$$

استفاده از روابط K و ω به دلیل استفاده از مدل آشفتگی K- ω (SST) برای لزجت می‌باشد که در این روابط، G_K انرژی سینتیکی^{۱۱} آشفته تولید شده، G_ω لزجت سینتیکی آشفته تولید شده، Y_K و Y_ω اتلاف K و ω توسط آشفتگی، Γ_K و Γ_ω میزان انتشار و پخش K و ω ، S_K و S_ω ترم چشمه و D_ω نشان دهنده اختلاف انتشار ω می‌باشند. برای گسسته سازی مشتق‌ها از روش پیشرو مرتبه ۲ و از الگوریتم سیمپل برای حل معادلات گسسته سازی شده استفاده شد.

۲-۲- هندسه و شرایط جریان

هندسه مورد نظر در این پژوهش ایرفویل ناکا ۲۴۱۲ با طول وتر ۰٫۲۶۸ متر می‌باشد (شکل ۱b). بررسی این ایرفویل به صورت سه بعدی انجام می‌شود بنابراین عرض آن در حالت بدون مولد گردابه ۰٫۰۱ متر و با مولد گردابه وابسته به ارتفاع مولد می‌باشد چون همان گونه که بیان شد عرض مولد گردابه پنج برابر ارتفاع آن است (شکل ۱a) که تعیین کننده عرض ایرفویل می‌باشد همچنین محل نصب مولد گردابه بر روی ایرفویل در ۲۵ درصد طول وتر از لبه حمله آن است. جریان عبوری از ایرفویل هوا است که دارای سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، فشار ۱۰۱۳۲۵ پاسکال، دمای ۳۰۰ کلوین و ضریب لزجت ۰٫۰۰۰۱۷۸۹۴ می‌باشد.

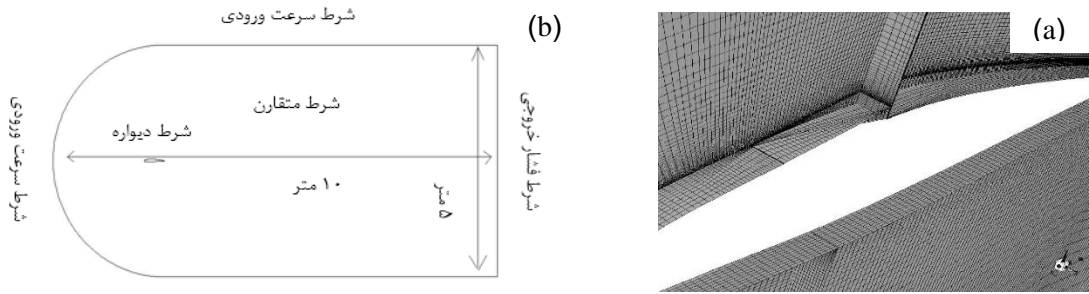


شکل ۱: (a) مولد گردابه گوه پیشرو، (b) ایرفویل ناکا ۲۴۱۲

۳-۲- شبکه بندی و شرایط مرزی

شبکه بندی مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار گمبیت با نوع شبکه با سازمان^{۱۲} انجام شد که در شکل ۲a نمونه‌ای از این شبکه را مشاهده می‌کنید. در شکل ۲b انواع مرزها و شرایط مرزی بیان شده است. مرز ورودی دارای شرط سرعت ورودی^{۱۳}، مرز خروجی دارای شرط فشار خروجی^{۱۴}، بر روی ایرفویل و مولد گردابه شرط مرزی دیواره^{۱۵} و در دوطرف فضای محاسباتی شرط مرزی متقارن^{۱۶} برقرار می‌باشند.

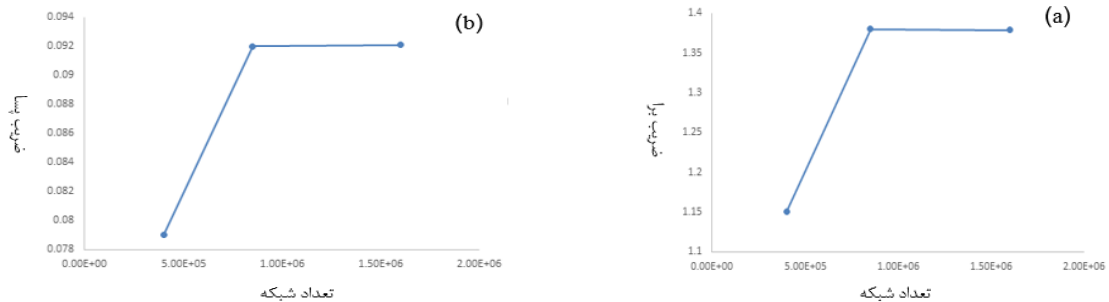
- 11 . Kinetic
- 12 . Structure
- 13 . Velocity inlet
- 14 . Pressure Outlet
- 15 . Wall
- 16 . Symmetry



شکل ۲: (a) نمونه شبکه بندی، (b) فضای محاسباتی و شرایط مرزی

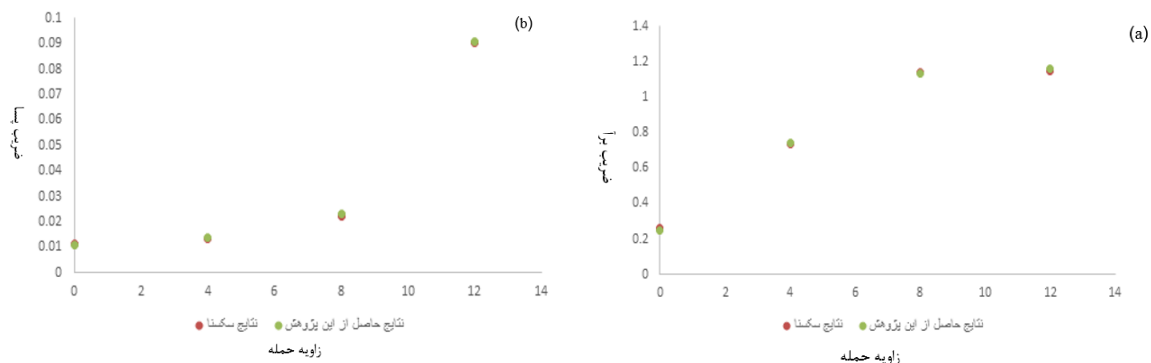
۲-۴- استقلال حل از شبکه و اعتبار سنجی حل عددی

به منظور بررسی استقلال نتایج حل عددی از اندازه شبکه، ضریب نیروی برآ و پسا برای حالت سه بعدی ایرفویل ناکا ۲۴۱۲ در زاویه حمله ۱۵ درجه در سه اندازه شبکه بررسی شد. همانطور که از شکل ۳a و ۳b مشخص است نتایج در تعداد شبکه ۸۵۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰۰۰ تفاوت چندانی ندارند پس می‌توان بیان کرد که در تعداد شبکه ۸۵۰۰۰۰ نتایج حل عددی دارای استقلال از شبکه می‌باشند.



شکل ۳: (a) استقلال نتایج ضریب برآ از تعداد شبکه در زاویه ۱۵ درجه، (b) استقلال نتایج ضریب پسا از تعداد شبکه در ۱۵ درجه

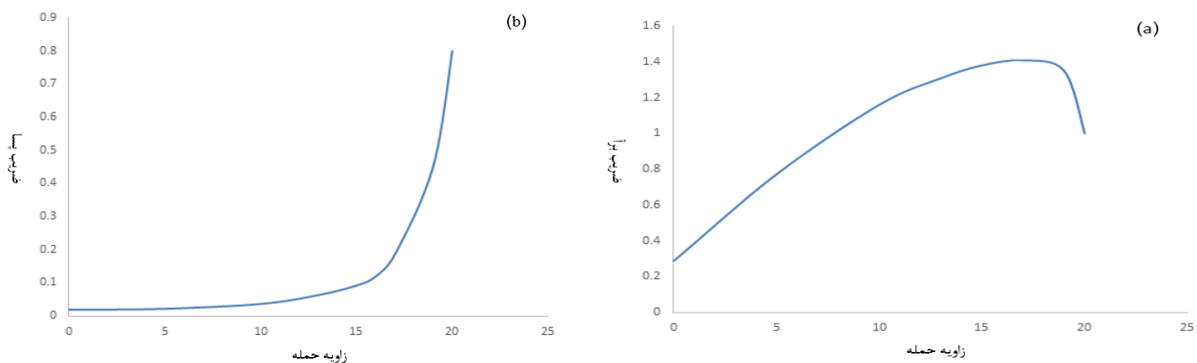
برای بررسی صحت نتایج حل عددی و پی بردن به اعتبار آنها، کار ساکسنا^{۱۷} و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. پژوهش ساکسنا و همکاران بر روی ایرفویل ناکا ۲۴۱۲ با طول وتر یک متر و رینولدز ۱۴۰۰۰۰ در چهار زاویه حمله ۰، ۸، ۱۰ و ۱۲ درجه انجام شد و ضرائب برآ و پسا اعلام شد [۸]. همانگونه که در شکل ۴ مشخص است نتایج بدست آمده بر روی هندسه ساکسنا و همکاران تطبیق خوبی با نتایج اعلام شده توسط آنها دارند بنابراین می‌توان بیان نمود که روش حل عددی استفاده شده در این پژوهش و نتایج آنها کاملاً صحیح و معتبر می‌باشند.



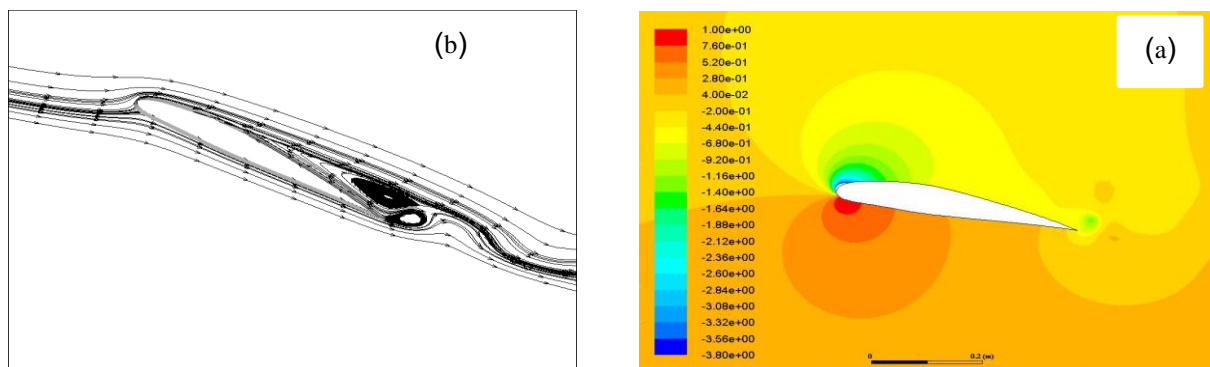
شکل ۴: (a) اعتبار سنجی بر روی ضریب برآ، (b) اعتبار سنجی بر روی ضریب پسا

۲-۵- نتایج و بحث روی نتایج ۲-۵-۱- ایرفویل بدون مولد گردابه

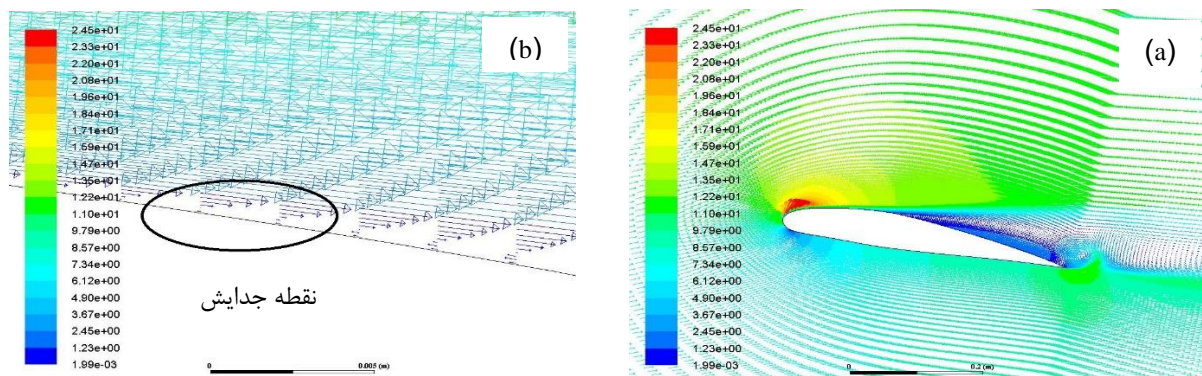
در ابتدا ضرائب نیروهای برآ و پسا برای ایرفویل بدون مولد گردابه بدست آمد که در شکل ۵ قرار گرفته‌اند. بیشترین ضریب نیروی برآ در زاویه ۱۷ درجه بدست می‌آید. در زوایای بیشتر از ۱۷ درجه جریان حالت واماندگی^{۱۸} ایجاد می‌شود که سبب کاهش نیروی برآ و افزایش شدید نیروی پسا می‌شود. همچنین کانتور ضریب فشار و خطوط جریان در شکل ۶ آورده شده‌اند. در کانتور بردار سرعت (شکل ۷) جدایش جریان به وضوح قابل رویت است. نقطه جدایش در ۳۱٫۳ درصد طول وتر قرار دارد که در شکل ۷ قابل مشاهده است. در این نقطه جهت جریان تغییر می‌کند که نشان دهنده نقطه جدایش است. پس مکان مولد گردابه که در ۲۵ درصد طول وتر است در بالادست آن قرار دارد.



شکل ۵: (a) نمودار ضریب برآ برای ایرفویل بدون مولد گردابه، (b) نمودار ضریب پسا برای ایرفویل بدون مولد گردابه

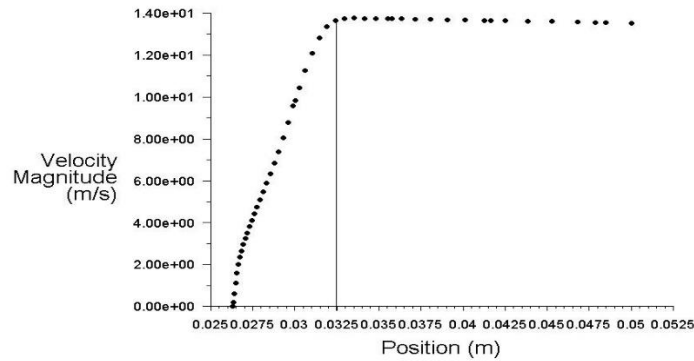


شکل ۶: (a) کانتور ضریب فشار در زاویه ۱۷ درجه در حالت بدون مولد گردابه، (b) خطوط جریان در ۱۷ درجه در حالت بدون مولد گردابه



شکل ۷: (a) کانتور بردار سرعت، (b) نقطه جدایش در زاویه ۱۷ درجه

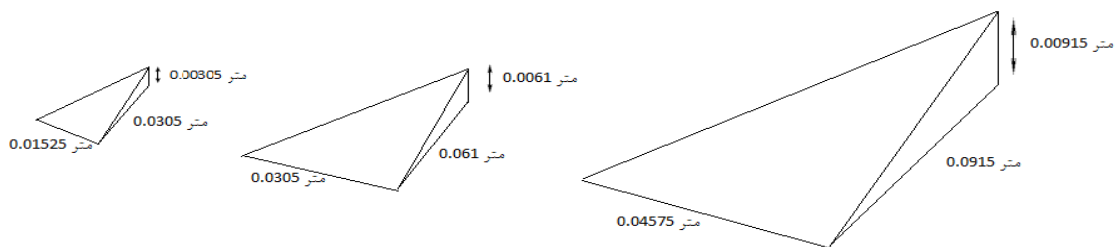
برای تعیین ضخامت لایه مرزی نمودار سرعت جریان در راستای عمودی، در ۲۵ درصد طول وتر رسم شده است (شکل ۸). جایی که سرعت جریان به ۰,۹۹ سرعت جریان بالای ایرفویل می‌رسد ضخامت لایه مرزی را معلوم می‌کند که در اینجا همانگونه که از شکل ۸ مشخص است ضخامت لایه مرزی ۰,۰۰۶۱ متر است.



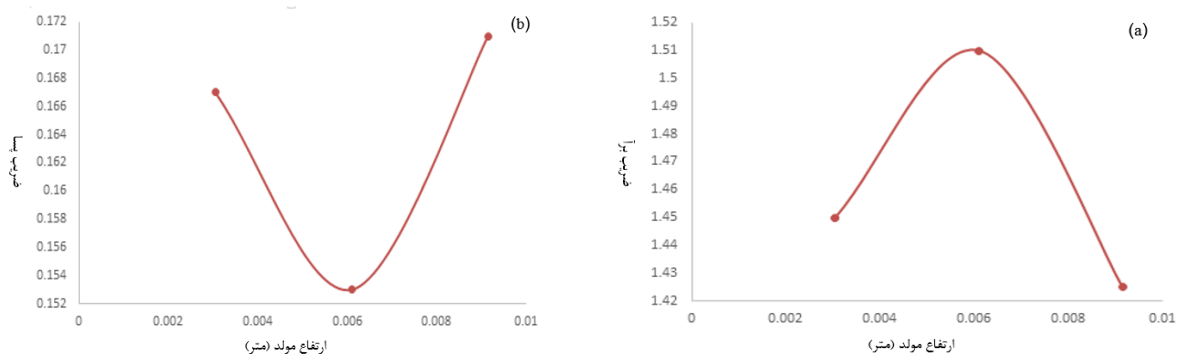
شکل ۸: نمودار سرعت در ۲۵ درصد طول وتر برای تعیین ضخامت لایه مرزی

۲-۵-۲- تعیین ارتفاع مناسب برای مولد گردابه

در قسمت قبل ضخامت لایه مرزی برای ۲۵ درصد طول وتر در زاویه حمله ۱۷ درجه بدست آمد حال برای تعیین ارتفاع مناسب برای مولد گردابه، سه ارتفاع نصف ضخامت لایه مرزی (۰,۰۰۳۰۵ متر)، برابر ضخامت لایه مرزی (۰,۰۰۶۱ متر) و ۱,۵ برابر ضخامت لایه مرزی (۰,۰۰۹۱۵ متر) در نظر گرفته شده و طول و عرض به نسبت هر ارتفاع برای مولد گردابه محاسبه شد (شکل ۹). برای بدست آوردن مناسب ترین گزینه، ضرائب برآ و پسا را برای سه حالت بدست آورده سپس یک خط از آنها گذرانده، در نمودارهای ایجاد شده ارتفاعی که بیشترین ضریب برآ و کمترین ضریب پسا را داراست، ارتفاعی مناسب برای ارتفاع مولد تلقی می‌شوند (شکل ۱۰). نتایج حاکی از آن است در ارتفاع برابر با ضخامت لایه مرزی بهترین نتیجه بدست می‌آید.

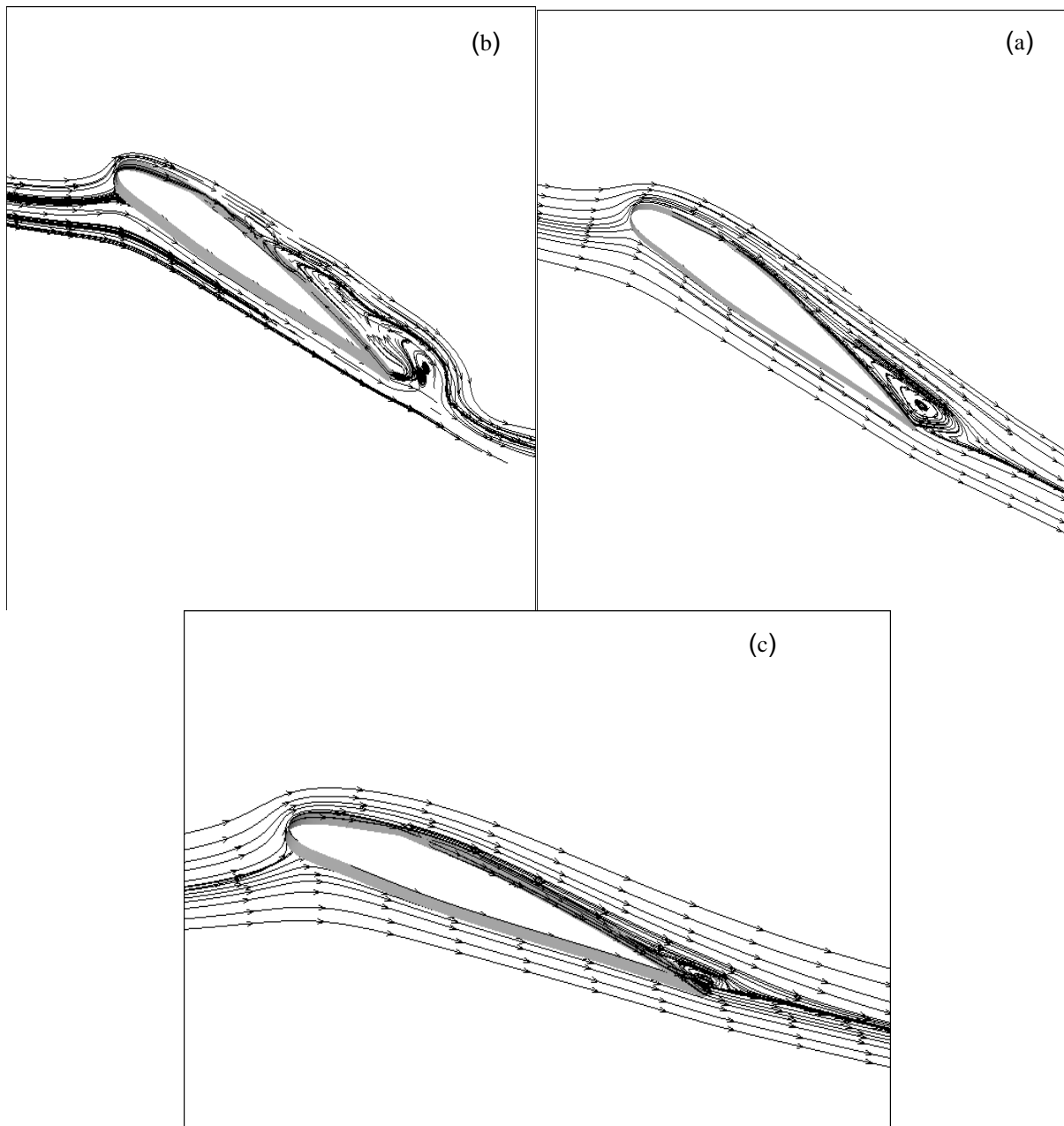


شکل ۹: مشخصات هندسی مولدهای گردابه در سه ارتفاع مختلف

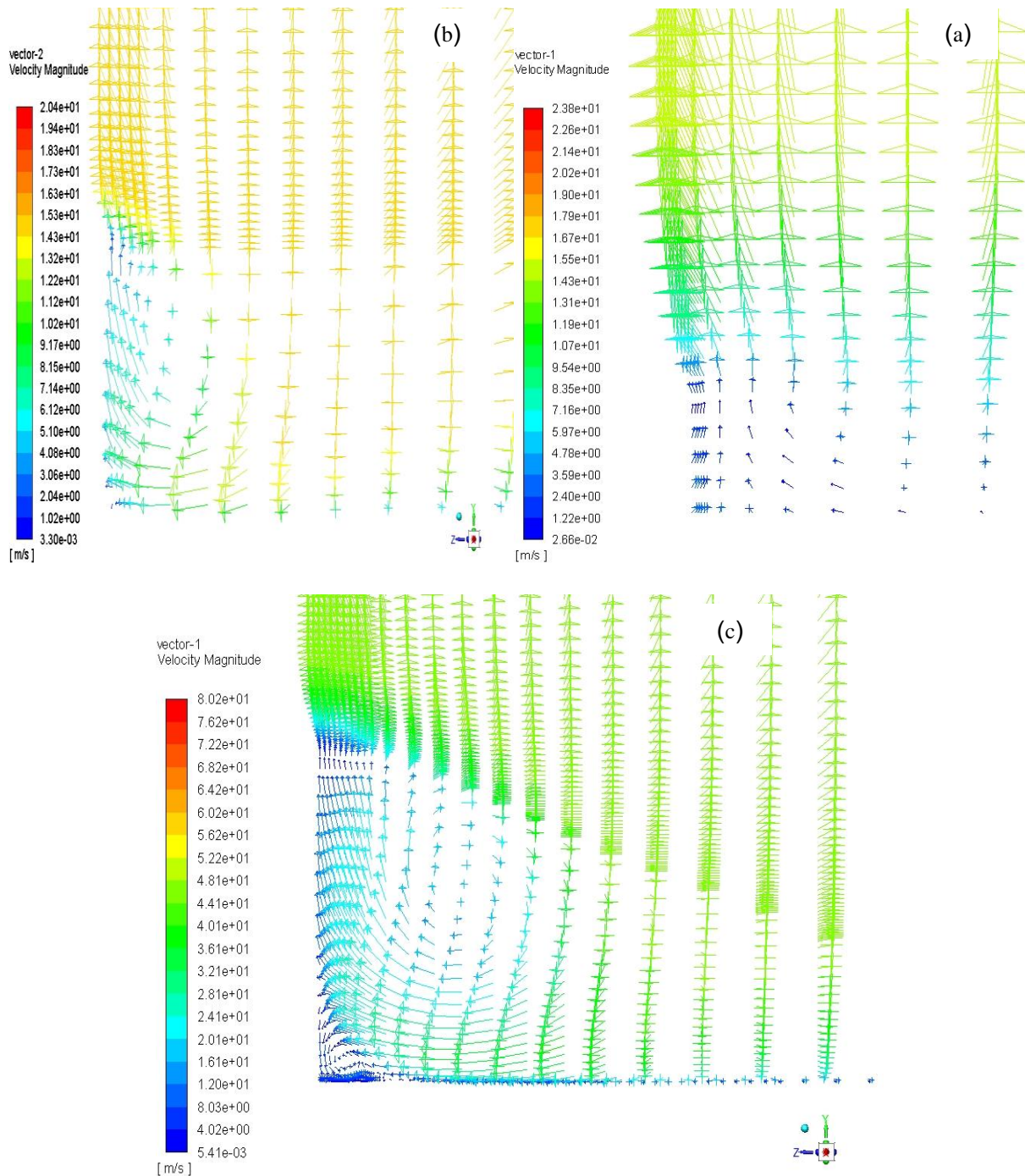


شکل ۱۰: (a) بدست آوردن ارتفاع مناسب مولد توسط ضریب برآ، (b) بدست آوردن ارتفاع مناسب مولد توسط ضریب پسا

همچنین براساس خطوط جریان‌های رسم شده در شکل ۱۱ می‌توان تشخیص داد که جدایش جریان در حالتی که ارتفاع مولد برابر با ضخامت لایه مرزی است بیشتر از دو حالت دیگر به تعویق می‌افتد. در شکل ۱۲ بردارهای سرعت در صفحه خروجی مولد گردابه نشان داده شده که نشان دهنده گردابه‌های تولید شده می‌باشند. با مشاهده گردابه‌های تولید شده می‌توان بیان نمود دلیل مناسب بودن ارتفاع برابر ضخامت لایه مرزی نسبت به سایر گزینه‌ها این است که در ارتفاع نصف ضخامت لایه مرزی به دلیل کوچک بودن گردابه‌های تولید شده و ضعیف بودن آنها، قدرت زیادی برای آشفته کردن لایه مرزی ندارند و در ارتفاع ۱٫۵ برابر ضخامت لایه مرزی به دلیل دور بودن اکثر گردابه‌های تولید شده از سطح لایه مرزی تاثیر زیادی در آشفته کردن لایه مرزی ندارند و فقط باعث ایجاد اغتشاش در قسمت جدا شده جریان می‌شوند بنابراین نمی‌توانند به خوبی از جدایش جریان جلوگیری کنند اما در ارتفاع برابر با ضخامت لایه مرزی گردابه‌های تشکیل شده تمام فضای لایه مرزی را دربر می‌گیرند و باعث آشفته شدن کامل لایه مرز و به تعویق افتادن جدایش جریان می‌شوند.



شکل ۱۱: خطوط جریان در سه اندازه مختلف مولد گردابه (a) ارتفاع مولد نصف ضخامت لایه مرزی، (b) ارتفاع مولد ۱٫۵ برابر ضخامت لایه مرزی، (c) ارتفاع مولد برابر با ضخامت لایه مرزی

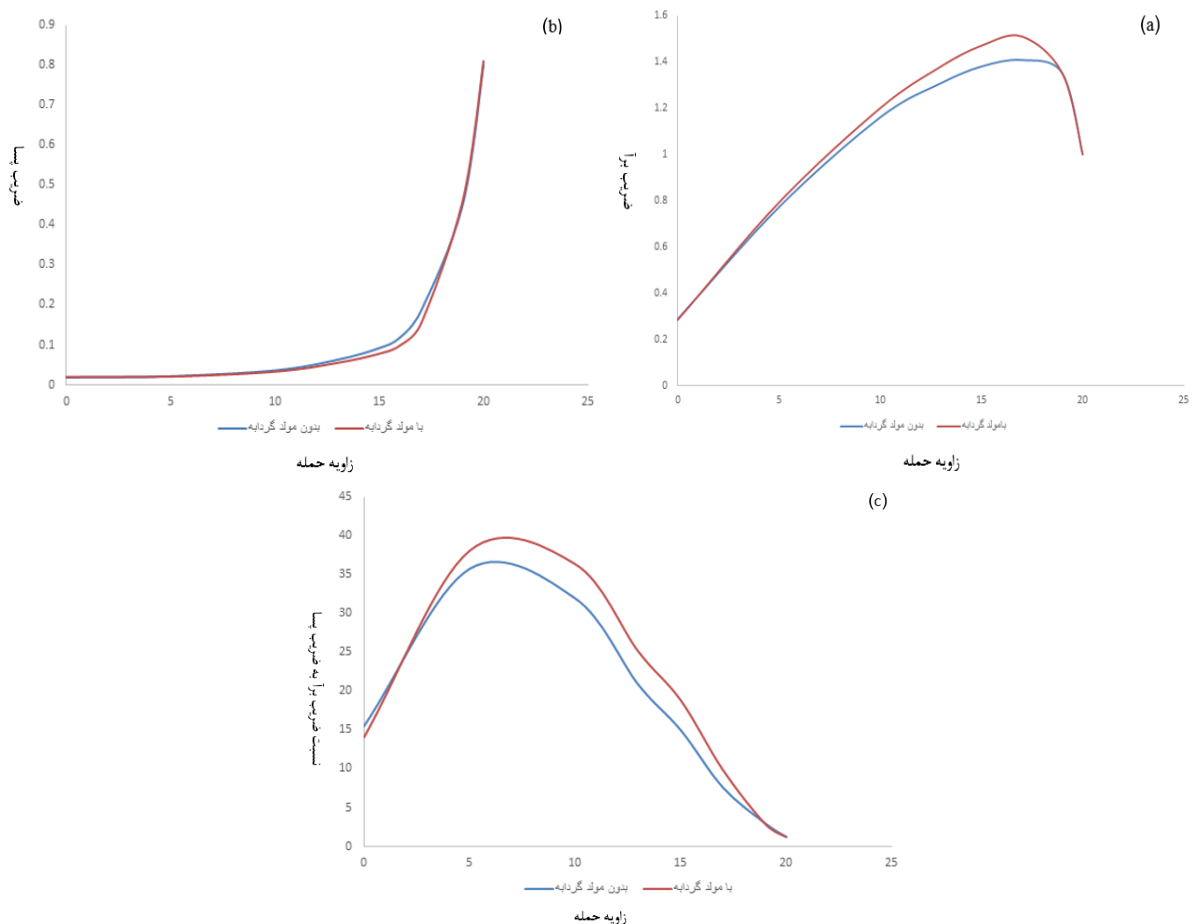


شکل ۱۲: بردارهای سرعت در صفحه خروجی مولد در سه اندازه مختلف مولد گردابه (a) ارتفاع مولد نصف ضخامت لایه مرزی، (b) ارتفاع مولد ۱٫۵ برابر ضخامت لایه مرزی، (c) ارتفاع مولد برابر با ضخامت لایه مرزی

۲-۵-۳- ایرفویل با مولد گردابه با ارتفاع ضخامت لایه مرزی

با تعیین شدن ارتفاع مناسب برای مولد گردابه و ثابت بودن آن بر روی ایرفویل در ۲۵ درصد طول وتر، باید اثر مولد گردابه در سایر زوایا را بررسی کرد. در شکل ۱۳ نمودارهای ضرائب برآ، پسا و نسبت ضریب برآ به ضریب پسا بر حسب زاویه حمله رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مولد گردابه باعث افزایش ضریب نیروی برآ و نسبت ضریب برآ به ضریب پسا و کاهش ضریب نیروی پسا در زوایای بالای ۲٫۵ درجه می‌شود. بیشترین تاثیر در زاویه ۱۷ درجه مشاهده می‌شود چون مشخصات مولد گردابه براساس مشخصات جریان در این زاویه بنا شده است اما در دیگر زوایا نیز تاثیر مثبتی دارد. دلیل کمتر

بودن اثر مولد آن است که ارتفاع مولد برای زاویه‌های کمتر از ۱۷ درجه بیشتر از ضخامت لایه مرزی آنها می‌شود و همانطور که در قسمت قبل بیان شد ارتفاع بیشتر از ضخامت لایه مرزی تاثیر کمتری در جلوگیری از جدایش جریان دارند. همچنین در زاویه‌های کمتر فاصله مولد گردابه از نقطه جدایش بیشتر شده بنابراین از قدرت گردابه‌های تولید شده تا رسیدن به نقطه جدایش کاسته شده که تاثیر کمتری در به تعویق انداختن جدایش جریان دارند. در زوایای کمتر از ۲,۵ درجه نیز به دلیل فاصله زیاد نقطه جدایش و مولد گردابه، نه تنها مولد گردابه تاثیری در جدایش جریان ندارد بلکه به عنوان یک جسم مضر بر روی ایرفویل به عمل می‌کند و باعث افزایش نیروی پسا شود.



شکل ۱۳: (a) نمودار ضریب نیروی برآ، (b) نمودار ضریب نیروی پسا، (c) نمودار نسبت ضریب برآ به ضریب پسا

۳- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر مثبت مولد گردابه بر روی ایرفویل ناکا ۲۴۱۲ مشاهده شد. مولد گردابه گوه پیشرو با ایجاد اغتشاش و انتقال انرژی جنبشی در لایه مرزی، باعث انتقال لایه مرزی از حالت لایه‌ای به حالت آشفتگی می‌شود که تاخیر در جدایش جریان را به همراه دارد. نتایج کلی به شرح زیر است:

- ۱- ارتفاع مناسب برای مولد گردابه گوه پیشرو برابر با ضخامت لایه مرزی می‌باشد. چون در این حالت مولد گردابه بیشترین تاثیر را بر روی نیروهای برآ و پسا دارد.
- ۲- استفاده از مولد گردابه باعث افزایش ۷,۲۴ درصدی ضریب برآ، ۱۷,۰۴ درصدی نسبت ضریب برآ به ضریب پسا و کاهش ۱۷,۲۹ درصدی ضریب پسا در زاویه ۱۷ درجه می‌شود که بیشترین تاثیر در بین تمام زوایا دارا می‌باشد زیرا مشخصات مولد گردابه مناسب این زاویه می‌باشد البته در تمام زاویه‌های بین ۲,۵ و ۱۹ درجه تاثیر مثبت دارد.

۳- در زاویه های زیر ۲,۵ درجه و بالای ۱۹ درجه مولد گردابه استفاده شده تاثیر منفی دارد به طور مثال در زاویه صفر درجه به دلیل دوری زیاد مولد گردابه از نقطه جدایش و بیشتر بودن ارتفاع آن از لایه مرزی نه تنها باعث افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا نمی شود بلکه باعث کاهش ۱,۳ درصدی ضریب برآ، ۹,۱۹ درصدی نسبت ضریب برآ به ضریب پسا و افزایش ۸,۶ درصدی در ضریب پسا می شود. در زاویه های بیشتر از ۱۹ درجه به دلیل قرار گرفتن در منطقه جدایش هیچ گونه تاثیر مثبتی در جریان ندارد.

۴- مولد گردابه در زاویه حمله ۱۷ درجه نقطه جدایش جریان را به میزان ۴۳ درصد طول وتر به سمت لبه فرار می راند. در جمع بندی کلی می توان بیان نمود، مولد گردابه گوه پیشرو را می توان برای افزایش برآ و کاهش پسا استفاده نمود به شرطی که در مکان درست با مشخصات هندسی مناسب قرار گیرد. نتایج این پژوهش برای زاویه حمله ی بالا (به طور مثال در هنگام بلند شدن و فرود هواپیما که زاویه حمله زیاد است) بسیار مناسب است.

مراجع

- [1] Lin J.C., 2002, Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation, Progress in Aerospace Sciences, vol. **38**, pp 389-420.
- [2] Ashill P., Fulker J. and Hackett K., 2001, Research at DERA on sub boundary layer vortex generators (SBVGs), In 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno,NV,U.S.A
- [3] Schubauer G.B. and Spangenberg W.G., 1960, Forced mixing in boundary layers, Journal of Fluid Mechanics, vol. **8**, pp 10-32.
- [4] Ashill P., Fulker J. and Hackett K., 2002, Studies of flows induced by sub boundary layer vortex generators (SBVGs), In 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno,NV,U.S.A
- [5] Chavez M., Sanvido S., Browne O.M. and Valero E., 2015, Numerical and Parametric Study of MVGs on a UAV Geometry in Subsonic Flow, In European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, pp 207-222.
- [6] Wang H., Zhang B., Qiu Q. and Xu X., 2017, Flow control on the NREL S809 wind turbine airfoil using vortex generators, Energy, vol. **118**, pp 1210-1221.
- [7] Li Q. and Liu C., 2010, Declining angle effects of the trailing edge of a microramp vortex generator. Journal of Aircraft, vol. **47**, pp 2086-2095.
- [8] Saxena E.S. and Kumar M.R., 2015, Design of NACA 2412 and its Analysis at Different Angle of Attacks, Reynolds Numbers, and a wind tunnel test, International Journal of Engineering Research and General Science, vol. **3**, pp 193-200.