



## بررسی عددی تأثیر پدیده اثر سطح بر گذر جریان آرام به آشفته در اعداد رینولدز پایین

مجتبی دهقان منشادی<sup>1\*</sup>، فرزاد پورفتاح<sup>2</sup>

1- استادیار، مجتمع مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان  
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان  
\* اصفهان، صندوق پستی: 153/83145@alum.sharif.edu

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 18 بهمن 1392  
پذیرش: 05 فروردین 1393  
ارائه در سایت: 02 مهر 1393  
کلید واژگان:  
جریان در اعداد رینولدز پایین  
گذر جریان  
لایه مرزی  
اثر سطح  
دینامیک سیالات محاسباتی

### چکیده

تمرکز مطالعه حاضر بر روی گذر جریان آرام به آشفته حول ایرفویل متقارن در جریان آزاد و تحت پدیده اثر سطح با عدد رینولدز پایین چهار هزار در زوایای حمله 5 و 8 درجه است. برای حل معادلات جریان آشفته، لزج و ناپایای حاکم بر جریان از روش حجم محدود استفاده شده است. نتایج با داده‌های تجربی دیگران مقایسه شده و مطابقت خوبی در پیش‌بینی ضرایب آیرودینامیکی تحت اثر پدیده سطح و جریان آزاد با اعداد رینولدز پایین مشاهده می‌شود. در الگوریتم عددی استفاده شده برای کوپل کردن میدان‌های سرعت و فشار از روش سیمپل‌سی و برای گسسته‌سازی معادلات مومنتم از روش مرتبه دوم و جهت مدل‌سازی آشفتگی جریان از مدل چهار معادله‌ای استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد روش حل عددی استفاده شده به منظور شبیه‌سازی جریان با عدد رینولدز پایین، قادر به تشخیص گردادیان فشار معکوس بوده و حباب‌های جدایش و گذر جریان آرام به آشفته لایه مرزی مشاهده شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد محل تشکیل حباب جدایش آرام، طول آن و گذر جریان آرام به آشفته تحت تأثیر حضور سطح زمین قرار می‌گیرد بطوریکه تحت تأثیر اثر سطح، محل گذر جریان و تشکیل حباب به لبه حمله ایرفویل متمایل شده و توزیع فشار روی ایرفویل تحت تأثیر تغییر محل تشکیل حباب‌ها است و در محل تشکیل حباب‌های جدایش آرام، توزیع فشار دچار تغییر روند می‌گردد.

## Numerical study about role of ground effect on flow transition from laminar to turbulent regime at low Reynolds numbers

Mojtaba Dehghan Manshadi\*, Farzad Pourfattah

Department of Mechanics and Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Esfahan, Iran.  
mdmanshadi@alum.sharif.edu \* P.O.B. 153/83145, Esfahan, Iran,

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 07 February 2014  
Accepted 25 March 2014  
Available Online 24 September 2014

**Keywords:**  
Flow at Low Reynolds Numbers  
Transition  
Boundary Layer  
Ground Effect  
CFD

### ABSTRACT

This study focuses on transition of laminar to turbulent flow around a symmetrical airfoil at a low Reynolds number in free flow and flow near the ground at different angles of attack. Finite volume method is adopted to solve the unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equation. Flow around the symmetrical airfoil SD8020 at a low Reynolds number (4000) at 5 and 8 degree angle attack has been simulated in free stream and near the ground numerically. Current numerical result is compared with other's experiment and numerical result in free flow at low Reynolds number and flow in ground effect that good agreement has been obtained in aerodynamic coefficient prediction. SIMPLEC method is used for pressure and velocity coupling and flow equations discrete with Quick method. Transition-SST model is used for modeling turbulence of flow. Result shows that the current numerical method can detect adverse pressure gradient, laminar separation bubble and transition of laminar flow to turbulent. According to the result, in ground effect location of laminar separation bubble, length of bubble and location of transition is moved to leading edge and pressure distribution is effected by location of laminar separation bubble.

### 1- مقدمه

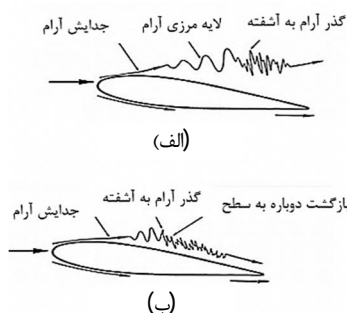
سطح زمین، پدیده اثر سطح مورد بررسی قرار گرفته و ضرایب آیرودینامیکی، توزیع سرعت و فشار روی سطح ایرفویل ارائه شده است. همچنین احمد و همکاران آیرودینامیک ایرفویل NACA4415 را تحت اثر سطح بررسی نموده- اند [4] و جز اندک مطالعات تجربی است که در آن به گذر جریان آرام به آشفته در حضور سطح زمین اشاره شده است. از جمله مطالعات عددی انجام شده در بررسی اثر سطح، می‌توان به مطالعه جان و همکاران [5]، فیروز و همکاران [6]، حسین و همکاران [7] اشاره نمود که صرفاً تأثیر نزدیک شدن

پرواز در نزدیکی سطح زمین، باعث ایجاد تغییراتی در ویژگی‌های آیرودینامیکی جریان می‌شود که مطالعه آن از دهه 1920 آغاز شده است [1،2]. در اکثر مطالعات عددی و تجربی انجام شده، تغییرات نیروی درگ و لیفت در نزدیکی سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفته است. از جمله مطالعات تجربی می‌توان به مقاله احمد و همکاران [3] اشاره کرد. در این مطالعه ویژگی‌های ایرفویل NACA0015 با در نظر گرفتن صفحه ساکن به‌عنوان

Please cite this article using:

M. Dehghan Manshadi, F. Pourfattah, Numerical study about role of ground effect on flow transition from laminar to turbulent regime at low Reynolds numbers, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 203-210, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 1 جریان حول ایرفویل با عدد رینولدز پایین [8] جدایش کامل و بدون بازگشت (ب) جدایش با بازگشت به سطح و تشکیل حباب جدایش

پیشنهاد خوبی برای مطالعات عددی آینده باشد. در این مطالعه، برای شبکه-بندی دامنه محاسباتی از نرم‌افزار انسیس و از نرم‌افزار تجاری فلونت به‌عنوان حلگر عددی استفاده شده است.

## 2- حل عددی میدان جریان

### 2-1- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان ناپایا، آشفته، دوبعدی و غیرقابل تراکم برای سیال با خواص ثابت و بدون در نظر گرفتن نیروهای حجمی به صورت روابط (1-3) است [10].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho\gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \gamma)}{\partial x_j} = P_{\gamma 1} - E_{\gamma 1} + P_{\gamma 2} - E_{\gamma 2} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

معادلات (1) تا (3) به همراه شرایط مرزی اشاره شده در بخش 2-4، به روش حجم محدود حل شده‌اند. در این روش، مدل سیال مورد نظر به صورت المان‌های حجمی، انتگرال‌گیری می‌شود. معادلات انتگرالی بدست آمده گسسته‌سازی شده و در نهایت معادلات بدست آمده در یک فرایند تکراری حل می‌شود. روش حل جریان نیز فشار مبنا بوده و معیار همگرایی در مطالعه حاضر  $10^{-6}$  در نظر گرفته شده است. همچنین در الگوریتم عددی استفاده شده به منظور حل میدان جریان برای کوپل کردن گرادیان‌های سرعت و فشار از روش سیمپل‌سی<sup>2</sup> و برای گسسته‌سازی معادله مومنتم از روش مرتبه دوم استفاده شده است. برای مدل‌سازی آشفتگی جریان نیز از مدل آشفتگی چهار معادله‌ای<sup>3</sup> استفاده شده است و معادله حاکم بر این مدل در رابطه (3) ارائه شده است. ضرایب  $P$  و  $E$  در این معادله جملات منابع گذر جریان بر حسب طول و تغییر شکل ناحیه گذار هستند. این مدل را می‌توان مدل توسعه یافته  $k-w$  تلقی کرد که به معادلات حاکم بر آن دو معادله دیگر بر حسب جملات ضخامت لایه مرزی و عدد رینولدز، برای تشخیص گذر جریان از آرام به آشفته اضافه شده و در جریان با اعداد رینولدز پایین بخوبی می‌تواند گردابان معکوس را تشخیص دهد که اخیراً به نرم‌افزار تجاری فلونت افزوده شده است. جزئیات معادلات حاکم بر این مدل و نحوه کوپل آن با مدل  $k-w$

به سطح زمین بر ضرایب آیرودینامیکی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. جریان با عدد رینولدز پایین در کاربردهای نظامی و غیرنظامی از اهمیت خاصی برخوردار است و در توربین‌های باد، هواپیماهای بدون سرنشین و گلایدرها کاربرد دارد. جریان در محدوده اعداد رینولدز کمتر از پنجاه هزار، پیچیدگی‌هایی دارد و با جریان با اعداد رینولدز بالا تفاوت‌های اساسی دارد که شامل پدیده جدایش آرام و تشکیل حباب جدایش آرام<sup>1</sup> و گذر جریان به آشفته است. گذر جریان آرام به آشفته تحت تأثیر عوامل محیطی قرار دارد و تشخیص محل دقیق آن و کنترل لایه مرزی آرام به منظور کاهش درگ آیرودینامیکی امروزه از چالش‌های مهم علم مکانیک سیالات شمرده می‌شود. در جریان با اعداد رینولدز پایین، دو نوع رژیم جریان وجود دارد، در اعداد رینولدز پایین‌تر جدایش کامل مشاهده می‌شود (شکل 1-الف) و در محدوده-ای نسبتاً بالاتر، جریان جدا شده به گرادیان فشار معکوس غلبه می‌کند و به سطح ایرفویل می‌چسبد و حباب جدایش تشکیل می‌شود (شکل 1-ب). همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، گذر جریان آرام به آشفته، در صورت تشکیل حباب جدایش آرام، بین نقطه جدایش و محل بازگشت جریان به سطح رخ می‌دهد و در اکثر مراجع، حباب جدایش آرام را دلیل نوسانات توزیع فشار روی سطح ایرفویل در جریان با عدد رینولدز پایین معرفی کرده‌اند. پدیده ایجاد حباب جدایش آرام را یاروسویچ [8] در جریان حول ایرفویل NACA0025 به‌صورت تجربی در جریان آزاد مورد مطالعه قرار داده و محدوده‌ای از اعداد رینولدز که در آن جدایش کامل یا حباب جدایش تشکیل می‌شود، مشخص کرده است. از جمله مطالعات تجربی دیگر که آیرودینامیک 60 نوع ایرفویل مختلف را مورد مطالعه قرار داده است، مطالعه اسلیگ و همکاران است [9] که امروزه به عنوان مرجعی برای اعتبارسنجی نتایج عددی از آن استفاده می‌شود. از مطالعات عددی انجام شده در بررسی جریان با عدد رینولدز پایین، مطالعه جونمین است [10] که نتایج عددی خود را با نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [9] مقایسه نموده و توانسته گرادیان فشار معکوس را شبیه‌سازی و تأثیر زاویه حمله را بررسی کند. شنگ و همکاران نیز با انجام مطالعات تجربی چند هندسه مختلف را مورد بررسی قرار داده و هندسه مناسب برای ایرفویل در جریان با عدد رینولدز پایین را معرفی کرده است [11] وحیدی و همکاران با استفاده از روش PIV جریان آزاد حول ایرفویل NACA4412 با عدد رینولدز 50000 را در زاویای حمله مختلف مورد مطالعه قرار داده‌اند، نتایج ارائه شده در مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد نقطه جدایش و اتصال دوباره به سطح، با افزایش زاویه حمله به سمت لبه حمله متمایل می‌شود [12].

ماتسجو و همکاران در سال 2012، با استفاده از کدنویسی، تأثیر اثر سطح بر عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل در جریان با اعداد رینولدز خیلی پایین حول ایرفویل NACA0002، NACA0004 و NACA008 را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مرجع که جریان به صورت پایا فرض شده، ضرایب لیفت و درگ ایرفویل و همچنین خطوط جریان ارائه شده است. در این مرجع به بزرگ‌تر شدن ناحیه جدایش تحت اثر سطح اشاره شده است [13] با مطالعه گسترده تحقیقات انجام شده در زمینه اثر سطح و جریان با اعداد رینولدز پایین، تا تاریخ نگارش این مقاله، مطالعه عددی در خصوص بررسی تأثیر پدیده اثر سطح در جریان با سرعت پایین و تأثیر آن بر محل نقطه گذر جریان از آرام به آشفته و تشکیل یا عدم تشکیل حباب جدایش آرام یافت نشده، لذا نتایج و روش حل عددی استفاده شده در این مطالعه، می‌تواند

2- SimpleC  
3- SST Transition

1- Laminar Separation Bubble(LBS)

شرط مرزی زمین در ضریب لیفت بررسی شده و نتایج بدست آمده در مطالعه حاضر با داده‌های تجربی مرجع [17] که ایرفویل NACA4412 را در شرایط اثر سطح با عدد رینولدز  $8 \times 10^5$  در زاویه حمله 6 درجه، بررسی کرده، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد شبکه‌بندی و روش حل عددی استفاده شده در مطالعه حاضر از دقت قابل قبولی برخوردار است و نتایج بدست آمده از شرط مرزی دیواره متقارن برای سطح زمین، نتایج قابل قبول-تری نسبت به شرط مرزی دیواره با اصل عدم لغزش ارائه می‌کند. از اینرو در مطالعه حاضر، سطح زمین، با شرط مرزی دیواره متقارن مدل‌سازی شده است.

در مطالعه حاضر، هدف اصلی بررسی تأثیر مجاورت سطح در توزیع شدت آشفتگی، محل گذر جریان آرام به آشفتگی و تشکیل حباب جدایش آرام<sup>3</sup> در جریان با عدد رینولدز پایین است، لذا ضرورت دارد نتایج این مطالعه، با نتایج تجربی دیگران که جریان با عدد رینولدز پایین مورد بررسی قرار داده‌اند، اعتبارسنجی شود تا از دقت نتایج عددی بدست آمده، اطمینان حاصل شود. به این منظور، در شکل 4 ضریب لیفت بدست آمده در مطالعه حاضر با نتایج تجربی مرجع [9] و نتایج عددی مرجع [10] که جریان با عدد رینولدز 40000 را در زوایای حمله مختلف حول ایرفویل SD8020 که معمولاً در سطوح کنترلی استفاده می‌شود، مورد مطالعه قرار داده‌اند، مقایسه گردیده و مطابقت خوبی حاصل شده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت مدل آشفتگی و

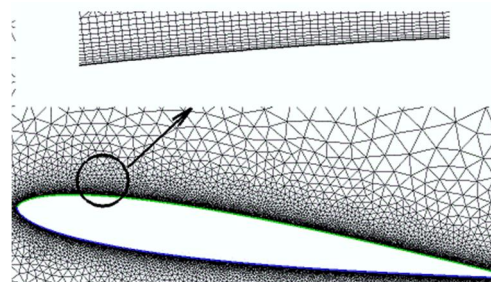
در مرجع [14] و معادلات حاکم بر مدل آشفتگی  $k-w$  در مرجع [15] مفصلاً شرح داده شده است.

## 2-2- استقلال شبکه

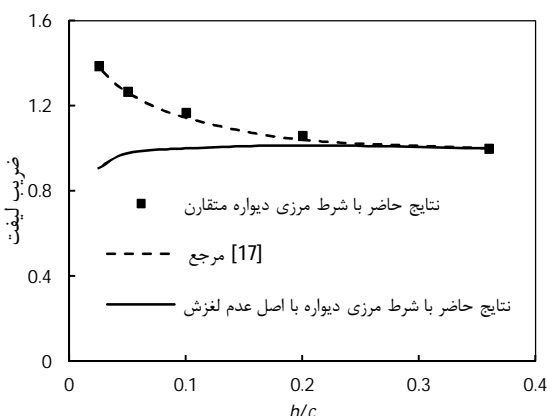
برای انتخاب شبکه مناسب، چندین شبکه با تعداد المان‌های مختلف در جریان با عدد رینولدز  $2 \times 10^5$  با زاویه حمله 6 درجه بررسی و ضریب برآ و پسا در هر مورد محاسبه شده و نهایتاً تعداد المان 100000 جهت انجام محاسبات انتخاب شده است. برای انجام محاسبات از سیستم کامپیوتری با 12 هسته پردازش و 32 گیگابایت رم استفاده شده است. شکل 2 شبکه محاسباتی حول ایرفویل را نشان می‌دهد که با استفاده از نرم‌افزار انسیس ایجاد شده است. به دلیل وجود گرادیان‌های شدید در نزدیکی ایرفویل، تراکم نوده‌های شبکه با یک نسبت رشد کوچک به نزدیکی دیواره ایرفویل منتقل شده و حول ایرفویل مش لایه مرزی اعمال شده است (شکل 2). در نرم‌افزار تجاری فلونت<sup>+</sup> با عنوان فاصله بی‌بعد شده از دیواره تعریف شده است. با توجه به استفاده از مدل آشفتگی 4 معادله‌ای گذرا، جهت ایجاد مش دقیق در نزدیک دیواره و بررسی مکان گذر جریان آرام به آشفتگی، مقدار این عدد بی‌بعد می‌بایست کمتر از 1 باشد تا سلول چسبیده به دیواره جزو ناحیه زیر لایه لزج نزدیک دیواره محسوب شود [16]. در مطالعه حاضر در تمامی موارد بررسی شده، حداکثر مقدار  $Y^+$  روی دیواره ایرفویل کمتر از 1 است.

## 2-3- شرایط مرزی و اعتبارسنجی روش حل عددی

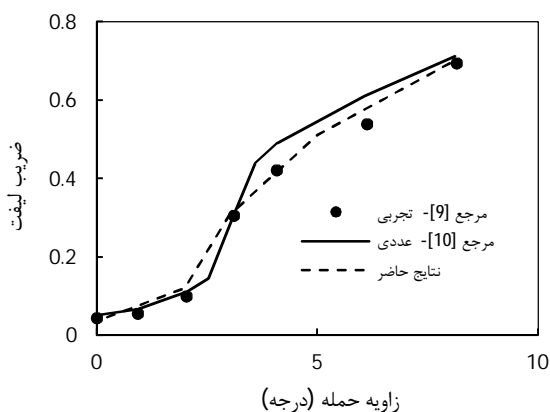
در دامنه محاسباتی، شرط مرزی سرعت ورودی برای ورودی و شرط مرزی فشار خروجی برای خروجی اعمال شده است، سطح زمین نیز با دو شرط مرزی مختلف دیواره با اصل عدم لغزش<sup>1</sup> و دیواره متقارن<sup>2</sup> مدل‌سازی شده است. در شرط مرزی دیواره با اصل عدم لغزش، مؤلفه‌های عمودی و مماسی سرعت صفر در نظر گرفته می‌شود و در شرط مرزی دیواره متقارن، مؤلفه سرعت عمودی صفر بوده و گرادیان عمودی سرعت و در نتیجه تنش برشی روی دیواره صفر در نظر گرفته می‌شود. در مراجع، علاوه بر دو شرط مرزی یاد شده برای سطح زمین، شرط مرزی دیواره متحرک با سرعتی برابر با سرعت جریان آزاد نیز بررسی شده است [5,6]. اعمال شرط مرزی مناسب به زمین تأثیر بسزایی در مقدار ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل در نزدیکی سطح زمین دارد. با اعمال شرط مرزی دیواره با اصل عدم لغزش به سطح زمین، هنگام عبور جریان روی آن لایه مرزی تشکیل می‌شود. این لایه مرزی ایجاد شده روی سطح، در فواصل نزدیک به سطح زمین با لایه مرزی ایجاد شده روی سطح زیرین ایرفویل تداخل پیدا می‌کند و با تغییر فشار در این ناحیه باعث می‌شود ضریب لیفت بدست آمده از شبیه‌سازی عددی در فواصل نزدیک به سطح زمین با نتایج آزمایشگاهی متفاوت باشد. در شکل 3 تأثیر



شکل 2 شبکه محاسباتی حول ایرفویل با اعمال لایه مرزی به دیواره



شکل 3 بررسی تأثیر شرط مرزی زمین و اعتبارسنجی نتایج بدست آمده با مرجع [17]

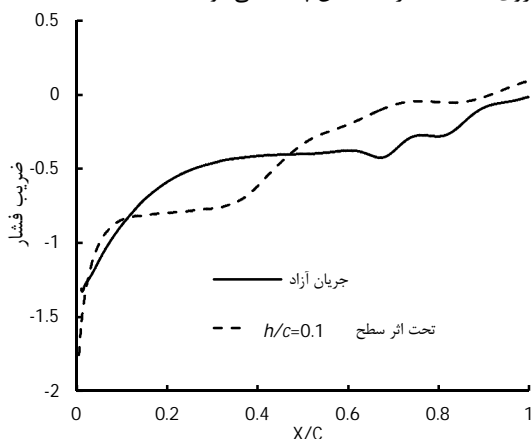


شکل 4 اعتبارسنجی نتایج عددی مطالعه حاضر با نتایج تجربی [9] و عددی [10]

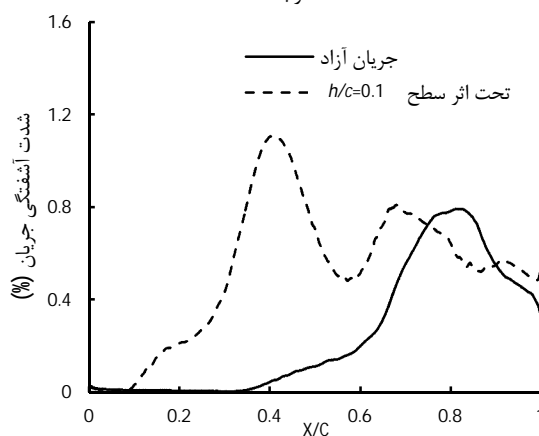
جریان آزاد به لبه حمله نزدیک می‌باشد. با بررسی توزیع فشار و شدت آشفتگی مشخص است که به دلیل اینکه در جریان تحت اثر سطح فقط در نزدیکی لبه حمله توزیع فشار نوسان داشته دارد، توزیع شدت آشفتگی نیز افزایش می‌یابد و با کاهش نوسانات توزیع فشار، شدت آشفتگی نیز کاهش می‌یابد.

در مراجع مختلف، محل حداکثر شدت آشفتگی جریان، نقطه گذر جریان آرام به آشسته معرفی شده است [4,13]. با بررسی این معیارهای مختلف مشخص می‌شود در شکل‌های 6 و 7، محل گذر جریان آرام به آشسته در جریان تحت اثر سطح تقریباً در  $x/c=0/4$  بوده اما در جریان آزاد محل گذر جریان آرام به آشسته تقریباً در  $x/c=0/8$  می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که تحت اثر سطح، در سطح بالایی ایرفویل، گذر جریان آرام به آشسته زودتر اتفاق می‌افتد و محل گذر به لبه حمله ایرفویل نزدیک‌تر است.

در شکل 8 توزیع فشار برای سطح پایینی ایرفویل در زاویه حمله 5 درجه نشان داده شده است. مطابق این شکل، توزیع فشار روی سطح پایینی ایرفویل هم در جریان آزاد و هم تحت اثر سطح، با سطح بالایی آن فرق دارد و عدم تغییر روند آن نشان می‌دهد در هر دو حالت، حباب جدایش در سطح پایین مشاهده نمی‌شود [10]. قابل ذکر است محبوس بودن جریان بین سطح زمین و ایرفویل باعث افزایش فشار شده و مقدار ضریب فشار در سطح پایینی ایرفویل، تحت پدیده اثر سطح بیشتر از جریان آزاد است که منجر به تولید نیروی لیفت بیشتر تحت این پدیده می‌شود.



شکل 6 توزیع فشار سطح بالایی در جریان آزاد و تحت اثر سطح در زاویه حمله 5 درجه



شکل 7 توزیع شدت آشفتگی سطح بالایی ایرفویل در جریان آزاد و تحت اثر سطح در زاویه حمله 5 درجه

روش حل عددی استفاده شده در مطالعه حاضر از دقت خوبی در شبیه‌سازی جریان با عدد رینولدز پایین برخوردار است.

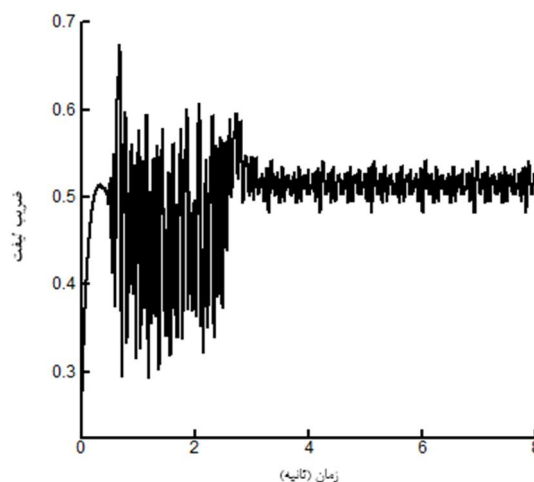
### 3- نتایج

هدف اصلی مطالعه حاضر، بر خلاف کارهای انجام شده قبلی محققان دیگر، که عمدتاً تغییرات ضرایب آیرودینامیکی را در مجاورت زمین بررسی کرده‌اند، مطالعه تأثیر مجاورت به سطح بر رفتار لایه مرزی جریان، تشکیل حباب جدایش و محل گذر جریان آرام به آشسته است. به این منظور نتایج ارائه شده شامل توزیع فشار، توزیع شدت آشفتگی و خطوط جریان حول ایرفویل است.

#### 3-1- توزیع فشار و شدت آشفتگی در زاویه حمله 5 درجه

با توجه به فیزیک ناپایایی جریان در عدد رینولدز پایین که به واسطه‌ی به وجود آمدن حباب و از بین رفتن آن است، ضرورت دارد جریان به صورت ناپایا مورد بررسی قرار گیرد. در شکل 5 نوسانات ضریب لیفت در 8 ثانیه نشان داده شده است. مطابق این شکل، پس از سه ثانیه، جریان یکنواخت شده است. لذا نتایج ارائه شده در مطالعه حاضر، از ثانیه چهارم به بعد است.

جریان در عدد رینولدز پایین، دارای ویژگی‌هایی منحصر به فردی است که بررسی عددی آن نسبت به بررسی جریان با عدد رینولدز بالا از پیچیدگی‌هایی برخوردار است. از جمله این پیچیدگی‌ها شبیه‌سازی گرادین فشار معکوس و تشکیل حباب جدایش است. عدد رینولدز مطالعه حاضر، 40000 می‌باشد و جریان با اعداد رینولدز پایین محسوب می‌شود. در شکل-های 6 و 7 به ترتیب توزیع فشار و شدت آشفتگی حول سطح بالایی ایرفویل در جریان آزاد و تحت اثر سطح در ارتفاع 0/1 متر از سطح در زاویه حمله پنج نشان داده شده است. نوسانات مشاهده شده در توزیع فشار، جدایش جریان و بازگشت دوباره به سطح را نشان می‌دهد که از آن به عنوان حباب جدایش آرام یاد می‌شود. مطابق شکل 6، در سطح بالایی ایرفویل، توزیع فشار نوسان دارد و محل شروع نوسان در جریان تحت اثر سطح نسبت به جریان آزاد به لبه حمله نزدیک‌تر است. در جریان آزاد نوسان توزیع فشار تا لبه فرار ادامه دارد که حضور حباب جدایش آرام در سطح بالایی ایرفویل تا لبه فرار را نشان می‌دهد. در ادامه بررسی مقدار ضریب لیفت نشان می‌دهد، وجود این حباب‌ها تا لبه فرار باعث کاهش ضریب لیفت می‌شود. در شکل 7 توزیع شدت آشفتگی روی سطح بالایی ایرفویل نشان داده شده است. مطابق این شکل، در جریان تحت اثر سطح، محل شروع افزایش شدت آشفتگی نسبت به

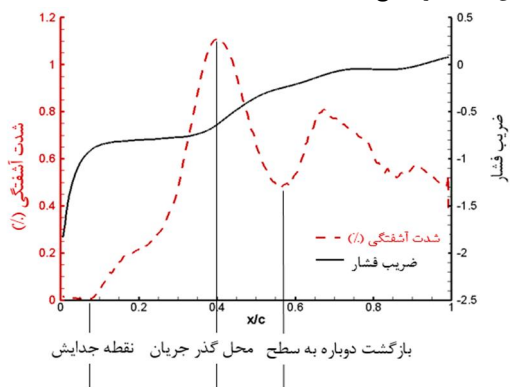


شکل 5 نوسانات ضریب لیفت در 8 ثانیه، جریان آزاد با زاویه حمله 5 درجه

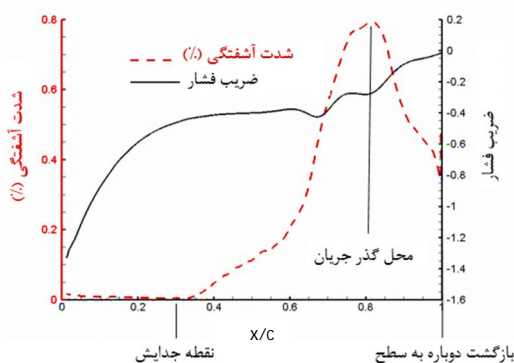
روال ثابت خود خارج می‌شود و در نهایت در نقطه  $x/c=0.58$  شدت آشفتگی کاهش می‌یابد (بازگشت دوباره به سطح و تشکیل حباب جدایش آرام). لذا مطابق این شکل، حباب جدایش آرام در محدوده  $0.1 < x/c < 0.58$  تشکیل می‌شود و در  $x/c=0.4$  گذر جریان آرام به آشفته رخ داده است.

در شکل 12، توزیع فشار و شدت آشفتگی جریان به همراه خطوط جریان در جریان آزاد نشان داده شده است. مطابق این شکل، در  $x/c=0.3$  جریان از سطح جدا شده و در  $x/c=0.8$  با تشکیل شدن دو حباب و نوسان توزیع فشار، شدت آشفتگی جریان به حداکثر خود می‌رسد و گذر جریان آرام به آشفته رخ می‌دهد. لذا مطابق این شکل، در جریان آزاد، محل تشکیل حباب جدایش آرام در محدوده  $0.4 < x/c < 1$  است.

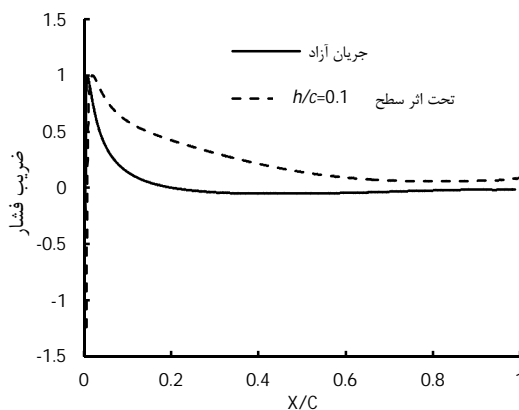
برای بررسی تأثیر محل جدایش جریان و بازگشت دوباره به سطح بر ضرایب لیفت و درگ، مقادیر این ضرایب در جدول 1 ارائه شده است. علاوه بر محسوس شدن جریان بین ایرفویل و سطح زمین و افزایش فشار جریان در سطح پایینی ایرفویل، کاهش ناحیه جدایش تحت پدیده اثر سطح در زاویه حمله‌ی 5 درجه، باعث افزایش ضریب لیفت تحت اثر سطح نسبت به جریان آزاد شده است. مقایسه دو مؤلفه ضریب درگ نشان می‌دهد، محل و طول حباب جدایش، در ضریب درگ اصطلاحی بیشتر تأثیرگذار بوده و به تعویق افتادن جدایش در جریان آزاد باعث شده است ضریب درگ اصطلاحی بیشتر از جریان تحت اثر سطح باشد.



شکل 11 توزیع فشار و شدت آشفتگی جریان و محل تشکیل حباب جدایش تحت اثر سطح در زاویه حمله 5 درجه



شکل 12 توزیع فشار و شدت آشفتگی جریان در جریان آزاد با زاویه حمله 5 درجه



شکل 8 توزیع فشار سطح پایینی ایرفویل در جریان آزاد و تحت اثر سطح در زاویه حمله 5 درجه

### 3-2- خطوط جریان در زاویه حمله‌ی 5 درجه

در شکل‌های 9 و 10 خطوط جریان در شرایط اثر سطح و جریان آزاد در زاویه حمله‌ی 5 درجه نشان داده شده است. با بررسی این دو شکل، مشخص می‌شود در زاویه حمله پنج درجه در جریان تحت اثر سطح و جریان آزاد، حباب جدایش ایجاد می‌شود و در مجاورت سطح زمین، محل تشکیل حباب جدایش به لبه حمله متمایل است اما در جریان آزاد محل تشکیل حباب جدایش به لبه فرار تمایل دارد. از شکل‌های ارائه شده در این قسمت می‌توان گفت، در جریان با اعداد رینولدز پایین، مجاورت سطح، جدایش جریان را به سمت لبه حمله نزدیک‌تر می‌کند و جریان با غلبه گرادیان فشار معکوس، به سطح ایرفویل بازمی‌گردد، اما در جریان آزاد جدایش به تعویق می‌افتد و ناحیه جدایش تا لبه‌ی فرار ادامه پیدا می‌کند.

### 3-3- محل جدایش، گذر جریان و بازگشت دوباره به سطح در زاویه حمله 5 درجه

برای بررسی بیشتر تأثیر حضور سطح زمین بر رفتار آیرودینامیکی جریان، تماماً توزیع فشار و توزیع شدت آشفتگی جریان به همراه خطوط جریان در زاویه حمله پنج درجه در شکل‌های زیر مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل 11 که مربوط به زاویه حمله پنج درجه تحت اثر سطح می‌باشد، در  $x/c=0.1$  با جدایش جریان از سطح ایرفویل (نقطه جدایش)، شدت آشفتگی جریان افزایش می‌یابد. پس از این محل، توزیع ضریب فشار ثابت باقی می‌ماند و در  $x/c=0.4$  شدت آشفتگی به بیشینه مقدار خود می‌رسد (محل گذر جریان از آرام به آشفته). پس از این نقطه با کاهش مقدار آن، توزیع فشار از



شکل 9 خطوط جریان در جریان تحت اثر سطح در زاویه حمله 5 درجه



شکل 10 خطوط جریان در جریان آزاد در زاویه حمله 5 درجه

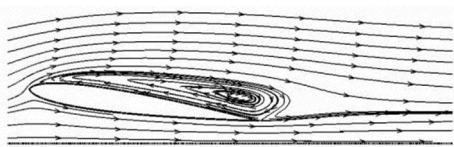
3-5- خطوط جریان در زاویه حمله 8 درجه

در شکل های 15 و 16 خطوط جریان در شرایط اثر سطح و جریان آزاد نشان داده شده است. مطابق شکل 15 در جریان تحت تأثیر اثر سطح، جریان جدا شده از سطح ایرفویل به سطح باز نمی گردد و ناحیه جدایش بزرگی روی ایرفویل مشاهده می شود، اما در شکل 16 که خطوط جریان در جریان آزاد نشان می دهد در لبه حمله ایرفویل، حباب جدایش با طول بسیار کم ایجاد شده و جریان جدا شده از سطح، مجدداً به سطح بازگشته است. لذا می توان نتیجه گرفت، جریان تحت اثر سطح در زوایای حمله بالا، قادر به غلبه بر گرادین فشار معکوس نیست و از سطح جدا می شود و ناحیه جدایش بزرگتری نسبت به جریان آزاد تشکیل می شود. همچنین با مقایسه شکل 15 با شکل 9 مشخص می شود، در جریان با زاویه حمله پنج درجه، حباب با طول بلند ایجاد شده در نزدیکی لبه فرار، با افزایش زاویه حمله به هشت درجه، به جایی با طول کمتر تبدیل شده و به نزدیکی لبه حمله متمایل شده است [18].

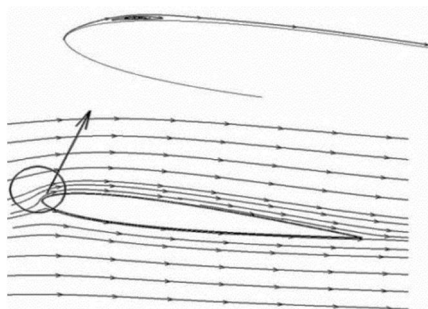
3-6- محل جدایش، گذر جریان و بازگشت دوباره به سطح در زاویه حمله 8 درجه

برای بررسی بیشتر تأثیر حضور سطح زمین بر رفتار آیرودینامیکی جریان، در شکل های 17 و 18 توأمأً توزیع فشار و توزیع شدت آشفتگی جریان به همراه خطوط جریان در زاویه حمله هشت درجه مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل 17، در جریان آزاد با زاویه حمله هشت درجه، در  $0 < x/c < 0.2$  حباب جدایش آرام تشکیل شده و در این محل، توزیع فشار دچار تغییر شده است و شدت آشفتگی جریان به دلیل حضور حباب، به صورت موضعی به حداکثر مقدار خود رسیده و گذر جریان آرام به آشسته در محدوده تشکیل حباب اتفاق افتاده است، اما مطابق شکل 18، تحت اثر سطح، جریان جدا شده از سطح توانایی بازگشت به سطح را نداشته و جدایش جریان بدون بازگشت به سطح رخ داده است.

به منظور ارزیابی رژیم جریان در دو زاویه حمله 5 و 8 درجه در جریان در عدد رینولدز پایین در شرایط جریان آزاد و اثر سطح، ضرورت دارد ضرایب لیفت و درگ شرایط یاد شده مقایسه شود تا تأثیر حضور سطح زمین و محل



شکل 15 خطوط جریان در جریان تحت پدیده اثر سطح در زاویه حمله 8 درجه



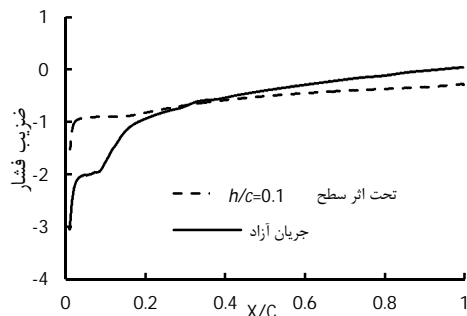
شکل 16 خطوط جریان در جریان آزاد در زاویه حمله 8 درجه

جدول 1 ضریب لیفت در زاویه حمله 5 درجه			
تحت اثر سطح ( $h/c=0.1$ )		جریان آزاد	
$Cd_p$	$Cd_f$	$Cd_p$	$Cd_f$
0/0319	0/0065	0/0295	0/0091

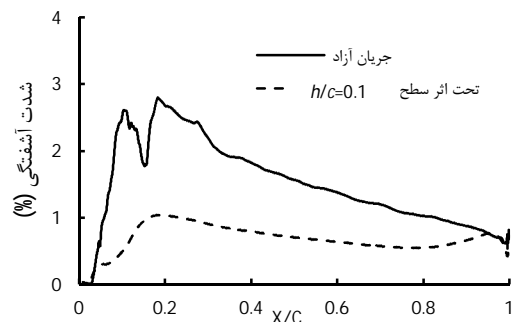
مطابق نتایج ارائه شده برای زاویه حمله پنج درجه، مشخص می شود در جریان با عدد رینولدز پایین، تحت اثر سطح محل جدایش جریان به لبه حمله متمایل می شود. حال اگر زاویه حمله به قدری افزایش یابد که در جریان آزاد، محل جدایش جریان در نزدیکی لبه حمله اتفاق بیفتد، انتظار می رود تحت اثر سطح، جریان کاملاً از ایرفویل جدا شود. در ادامه به بررسی ویژگی های جریان در زاویه حمله هشت درجه پرداخته شده است.

3-4- توزیع فشار و شدت آشفتگی در زاویه حمله 8 درجه

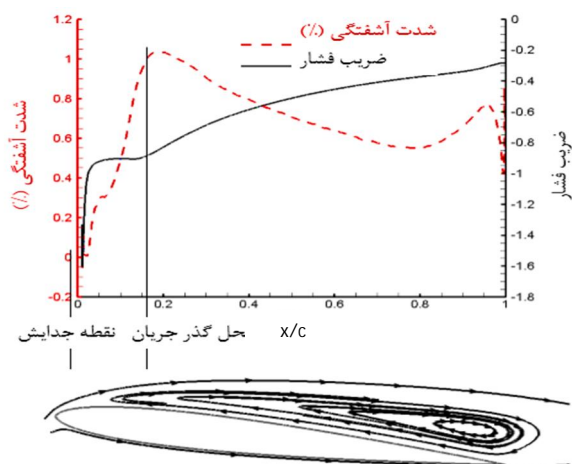
در شکل 13 توزیع فشار در زاویه حمله هشت درجه برای سطح بالایی ایرفویل در جریان تحت اثر سطح و جریان آزاد نشان داده شده است. مطابق این شکل، در جریان تحت اثر سطح، توزیع فشار نوسانی ندارد اما توزیع فشار در جریان آزاد تا  $x/c=0.2$  نوسان دارد و پس از آن ثابت باقی می ماند. در شکل 14 توزیع شدت آشفتگی جریان در جریان آزاد و تحت تأثیر اثر سطح در این زاویه حمله نشان داده شده است. مطابق این شکل، میزان شدت آشفتگی در جریان آزاد بیشتر است و کاهش ناگهانی آن در مقطع  $x/c=0.15$  نشانگر گذر جریان به آشسته و بازگشت به سطح ایرفویل است. در مقایسه توزیع فشار و شدت آشفتگی در شکل های زیر با جریان با زاویه حمله 5 درجه، می توان به تغییر روند جریان در زاویه حمله 8 درجه نسبت به زاویه حمله 5 درجه پی برد. در ادامه با مطالعه خطوط جریان، تأثیر زاویه حمله بر رفتار جریان مشخص شده است.



شکل 13 توزیع فشار سطح بالایی در جریان آزاد و تحت اثر سطح در زاویه حمله 8 درجه



شکل 14 توزیع شدت آشفتگی سطح بالایی ایرفویل در جریان آزاد و تحت اثر سطح در زاویه حمله 8 درجه



شکل 18 توزیع فشار و شدت آشفتگی جریان در جریان تحت اثر سطح با زاویه حمله 8 درجه

جدول 2 ویژگی های جریان در شرایط مختلف

شرایط جریان	حباب / محل تشکیل	ضریب درگ	ضریب لیفت	L/D
جریان آزاد زاویه حمله 5 درجه	$0.4 < x/c < 1$	0/0386	0/505	13
مجاورت سطح زمین زاویه حمله 5 درجه	$0.1 < x/c < 0.58$	0/0384	0/677	17/6
جریان آزاد زاویه حمله 8 درجه	$0 < x/c < 0.2$	0/0464	0/717	15/5
مجاورت سطح زمین زاویه حمله 8 درجه	جدایش کامل	0/1202	0/806	6/7

- 2- در زاویه حمله 5 درجه، تحت اثر سطح، با تشکیل حباب جدایش آرام نزدیکی لبه حمله ایرفویل، گذر جریان آرام به آشسته نسبت به جریان آزاد، زودتر اتفاق می افتد.
- 3- با افزایش زاویه حمله از 5 به 8 درجه، حباب تشکیل شده در جریان آزاد به سمت لبه حمله متمایل شده و طول آن کاهش می یابد و گذر جریان آرام به آشسته زودتر اتفاق می افتد.
- 4- در جریان با زاویه حمله 8 درجه، تحت پدیده اثر سطح، جدایش کامل از ایرفویل مشاهده می شود و ضریب درگ به شدت افزایش و راندمان ایرودینامیکی کاهش می یابد.
- 5- در جریان با اعداد رینولدز پایین در مجاورت سطح، زوایای حمله بالاتر شرایط ایرودینامیک جریان را بحرانی می کند و لذا در این رژیم جریان، در مجاورت سطح پرواز با زاویه بالا توصیه نمی شود.

#### 5- فهرست علائم

- $P$  فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )  
 $V_{\infty}$  سرعت جریان بالا دست ( $\text{m.s}^{-1}$ )  
 $C$  طول کورد ایرفویل (متر)  
 $X/C$  طول بی بعد شده ایرفویل  
 $Re = \frac{\rho V_{\infty} C}{\mu}$  عدد رینولدز  
 $C_{Dp} = \frac{\int p \cdot \cos\theta \cdot d\theta}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2}$  ضریب درگ فشاری

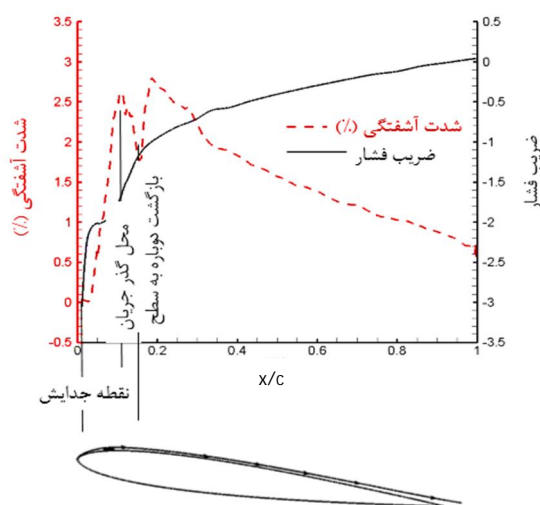
تشکیل حباب جدایش آرام با عدم تشکیل آن، بر ضرایب ایرودینامیکی مشخص شود. به این منظور ضرایب ایرودینامیک لیفت و درگ، در شرایط مختلف در جدول 2 ارائه شده است.

با بررسی تأثیر زاویه حمله در این جدول مشخص می شود، در صورت وجود حباب جدایش، با افزایش زاویه حمله، طول آن کاهش یافته و محل تشکیل آن به سمت لبه حمله متمایل می شود [10] و این امر باعث افزایش بیشتر ضریب لیفت نسبت به افزایش ضریب درگ شده و به افزایش راندمان ایرودینامیکی ایرفویل در زاویه حمله 8 درجه، بیشتر از زاویه حمله 5 درجه منجر می شود. بررسی تأثیر مجاورت سطح نیز نشان می دهد در جریان با زاویه حمله یکسان، ضریب لیفت افزایش می یابد و در صورتیکه حباب جدایش تشکیل شود (زاویه حمله 5 درجه) مجاورت اثر سطح با کاهش طول حباب جدایش و متمایل کردن آن به سمت لبه حمله، باعث کاهش ضریب درگ می شود. همچنین محبوس شدن جریان بین سطح پایینی ایرفویل و سطح زمین باعث افزایش ضریب لیفت می شود، لذا در مجموع مجاورت سطح زمین، راندمان ایرودینامیکی ایرفویل را افزایش می دهد. از بررسی نتایج ارائه شده در جدول مربوط به جریان با زاویه حمله 8 درجه نیز مشخص می شود در اثر مجاورت سطح زمین ضریب لیفت افزایش می یابد، اما به دلیل جدایش کامل جریان از سطح ایرفویل، ضریب درگ به شدت افزایش یافته و راندمان ایرودینامیکی به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. لذا می توان نتیجه گرفت در جریان در عدد رینولدز پایین، در مجاورت سطح، زوایای حمله بالا مطلوب نیست.

#### 4- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، در جریان با عدد رینولدز پایین، تأثیر پدیده اثر سطح بر توزیع فشار، توزیع آشفتگی جریان محل گذر جریان آرام به آشسته و رژیم لایه مرزی در جریان حول ایرفویل SD8020 به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر حاصل شده است.

- 1- در زاویه حمله 5 درجه، حباب جدایش در جریان آزاد و تحت پدیده اثر سطح مشاهده می شود، ولی طول و محل تشکیل آن، تحت تأثیر حضور زمین قرار دارد. بطوری که در جریان آزاد حباب با طول بلند نزدیک لبه فرار ایجاد می شود، اما تحت اثر سطح محل تشکیل حباب به سمت لبه حمله متمایل می شود و طول آن کاهش می یابد.



شکل 17 توزیع فشار و شدت آشفتگی جریان در جریان آزاد با زاویه حمله 8 درجه

[5] H. Chun, R. Chang, Turbulence flow simulation for wings in ground effect with two ground conditions: fixed and moving ground. *International Journal of Maritime Engineering*, Vol. 145, pp. 51-68, 2003.

[6] A. Firooz, M. Gadami. Turbulence flow for NACA 4412 in unbounded flow and ground effect with different turbulence models and two ground conditions: fixed and moving ground conditions. *International conference on boundary and interior layers. Gottingen*, 2006.

[7] C. Hsiun, C. Chen. Aerodynamic characteristics of a two-dimensional airfoil with ground effect. *Journal of Aircraft*, Vol. 33, No. 2, pp. 386-392, 1996.

[8] S.Yarusevych, On vortex shedding from an airfoil in low reynolds number flows", *J. Fluid Mec*, Vol. 632, pp. 245-271, 2009.

[9] M. Selig, Summary of Low-Speed airfoil data, *SoarTech Publications Virginia Beach, Virginia*, Vol. 1, 1995.

[10] L. Juanmian, Numerical study of separation on the trailing edge of a symmetrical airfoil at a low Reynolds number, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 26, No. 4, pp. 918-925, 2013.

[11] Y.H. Sheng, A study of low-Reynolds-number performance over a two dimensional airfoil for micro-air vehicle [dissertation]. Nanjing: *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*; 20. 2003.

[12] R. Wahidi, W. Lai, J.P. Hubner, Time-averaged and time-resolved volumetric velocimetry measurements of a laminar separation bubble on an airfoil, *European Journal of Mechanics Fluids*, pp 41 46-59, 2013.

[13] D. Mateescu, O. Scholz, C. Wang, Aerodynamics of airfoils at low Reynolds numbers in the proximity of the ground, *12th Pan-American Congress of Applied Mechanics*. Trinidad-Spain 2012.

[14] Theory Guide of Ansys Fluent 14.

[15] C.D. Wilcox, Turbulence modeling for CFD, *DCW Industries*, 2006.

[16] A.E. Ockfen, Viscous modeling of ground effect aerodynamics of Airfoil and jet, Thesis master of Science in mechanical engineering, *Washington State University, Washington DC, USA*, 2008.

[17] M. Kikuchi, Hirano, T.Yuge, K.Iseri, Y.Kohma. Measurement of airfoil characteristics by method of towing, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*; Vol. 68, No. 676, pp. 3378-3385, 2002.

[18] I. Tani, Low Speed Flows Involving Bubble Separations. *Aerospace Sciences*, Vol. 5, 70-103, 1964.

ضریب درگ اصطکاکی  $C_{df} = \frac{\int \tau \cdot \sin\theta \cdot d\theta}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2}$

ضریب درگ کل  $C_D = \frac{\int p \cdot \cos\theta \cdot d\theta + \int \tau \cdot \sin\theta \cdot d\theta}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2}$

ضریب لیفت  $C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2}$

فاصله بی بعد شده از دیواره  $y^+ = \frac{(\rho y \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}})}{\mu}$

شدت آشفتگی جریان  $\frac{U'}{U}$

راندمان آیرودینامیکی  $\frac{L}{D}$

علامه یونانی

چگالی  $\rho$  ( $\text{kgm}^{-3}$ )

لزجت دینامیکی  $\mu$  ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )

زاویه حمله  $\theta$  (درجه)

6- مراجع

[1] A. Raymond, Ground influence on airfoils, NACA technical note 67, 1921.

[2] K.V. Rozhdestvensky, Ekranoplans, The GEMs of fast water transport, *Trans Inst Mar Eng*, London 2997, 209(Part 2), pp. 47-74.

[3] M.R. Ahmed, S.D. Sharma, An investigation on the aerodynamics of a symmetrical aerofoil in ground effect, *Exp. Therm. Fluid. Sci*, Vol. 29, pp. 633-647, 2005.

[4] M.R. Ahmed, Aerodynamics of a cambered airfoil in ground effect, *International Journal of Fluid Mechanics Research*, Vol. 32, No. 2, 158-183, 2005.