

## بهبود عملکرد آیرودینامیکی بالواره‌های نوسانی با حرکت فراز و فرود در اعداد رینولدز پایین

## با استفاده از انتقال حرارت\*

احمد سمیعی<sup>(۱)</sup> محمدحسن جوارشکیان<sup>(۲)</sup> مجتبی هنرمند<sup>(۳)</sup>

**چکیده** در این تحقیق، اثر انتقال حرارت بر روی ضرایب برآ و پسای دو بالواره متقارن و انحنادار با حرکت نوسانی فراز و فرود در جریان لایه‌ای، به روش عددی بررسی شده است. معادلات ناویراستوکس قابل تراکم توسط یک روش عددی بر مبنای حجم محدود گسسته و با الگوریتم پیمپل حل شده‌اند. در این شبیه‌سازی لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی سیال متغیر در نظر گرفته شده است و از تکنیک شبکه‌های دینامیکی استفاده گردیده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، با کاهش دمای سطح بالواره‌ها نسبت به دمای جریان آزاد، نسبت برآ به پسا افزایش می‌یابد. همچنین اثر انتقال حرارت بر الگوی گردابه‌ها در لبه انتهایی بالواره‌ها و در نتیجه تأثیر آن بر ضرایب آیرودینامیکی آنها بررسی شده است.

**واژه‌های کلیدی** انتقال حرارت، حجم محدود، شبکه دینامیکی، عدد رینولدز.

### Improvement of Aerodynamic Performance of Oscillating Airfoils with Plunging Motion at Low Reynolds Numbers Using Heat Transfer

A. Samiee

M.H. Djavarehshkian

M. Honarmand

**Abstract** In this study, the effect of heat transfers on lift and drag coefficients of two symmetric and camber airfoils with plunging motion in laminar flow is numerically investigated. The compressible Navier–Stokes equations are discretized using a finite volume method and they are solved by PIMPLE algorithm. In this simulation, fluid dynamic viscosity and thermal conductivity are considered to be variable. Also dynamic mesh method is used for oscillating motion. The results show that, by reducing the airfoil surface temperature less than the free flow temperature, lift to drag ratio increases. Moreover, influence of heat transfer on vortexes pattern at airfoils trailing edge and therefore its impact on the aerodynamic coefficients are investigated.

**Key Words** Heat Transfer; Finite Volume; Dynamic Mesh; Reynolds number.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۵/۲۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۶/۴/۱۴ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v30i1.58136

(۱) کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

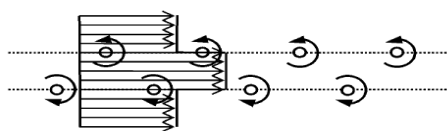
(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. javarehshkian@um.ac.ir

(۳) کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

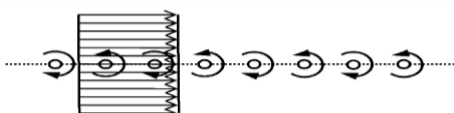
مقدمه

بالواره‌های نوسانی در تعدادی از وسایل مانند توربین‌های باد عمود محور، وسایل هوایی ریز پرنده (MAV) استفاده می‌شوند. ارتقای هر چه بیشتر این وسایل یکی از زمینه‌های تحقیقاتی روز می‌باشد. نوع نیروی تولید شده به وسیله حرکت‌های نوسانی یک جسم بستگی به ساختار گردابه‌های پشت جسم دارد. وون کارمن و برگز [1] در سال ۱۹۳۵ اشاره می‌کنند که اگر گردابه‌های پشت جسم در ردیف بالا ساعتگرد و در ردیف پایین پادساعتگرد بچرخند، کمبود مومتم (پروفیل سرعت متوسط در شکل (۱) نشان داده شده است) در دنباله (wake) در مقایسه با جریان بالادست منجر به تولید نیروی پسا می‌شود و در این حالت دنباله پشت جسم به دنباله تولیدکننده پسا معروف است.

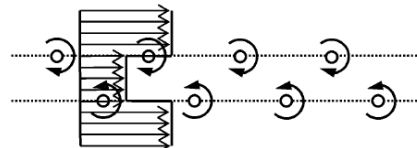
خود منجر به افزایش نیروی پسا و یا نیروی رانش می‌شود. کاهش این فاصله عمودی تا نزدیک صفر باعث می‌شود که دو ردیف گردابه‌ها در یک ردیف قرار بگیرند و این حالت منجر به تولید پسا و یا رانش صفر خواهد شد. دنباله پشت جسم در این حالت به دنباله خنثی (Neutral wake) معروف است [2]. پروفیل سرعت متوسط در شکل (۳) برای حالت فوق نشان داده شده است.



شکل ۲ ساختار گردابه‌های تولیدکننده نیروی رانش [2]



شکل ۳ ساختار گردابه‌های تولیدکننده نیروی رانش و یا پسا صفر [2]



شکل ۱ ساختار گردابه‌های تولیدکننده نیروی پسا [2]

لای و پلاتزر [3] در سال ۱۹۹۹ مشخصه‌های دنباله یک بالواره نوسانی را به عنوان تابعی از فرکانس، دامنه و سرعت جریان آزاد به صورت تجربی مطالعه نمودند. همچنین آنها الگوی خاصی از دنباله را به ازای دامنه و فرکانس‌های خاص مشاهده کردند. برای مثال شکل‌های (۴ و ۵) که نتایج کارهای آزمایشگاهی آنها است، به ترتیب گردابه‌های از نوع تولیدکننده نیروی رانش و خنثی می‌باشند.



شکل ۴ نتایج آزمایشگاهی لای و پلاتزر، دنباله تولیدکننده رانش [3]

عکس آن، هنگامی است که گردابه‌ها در ردیف بالا پادساعتگرد و در ردیف پایین ساعتگرد بچرخند که در آن صورت پروفیل سرعت متوسط نشان داده شده در شکل (۲)، مشابه پروفیل جت، حاکی از آن است که مومتم دنباله بیشتر از جریان بالادست است که منجر به تولید نیروی رانش می‌شود و ساختار دنباله پشت جسم به دنباله تولیدکننده نیروی رانش معروف است. آنها اشاره می‌کنند که قدرت این نیروها به فاصله عمودی و افقی بین ردیف‌های گردابه‌ها بستگی دارد. اگر فاصله عمودی بین ردیف‌ها افزایش یابد، ناحیه سرعت متوسط کمتر (در حالت پسا) و یا ناحیه سرعت متوسط بالاتر (در حالت رانش) افزایش می‌یابد که



شکل ۵ نتایج آزمایشگاهی لای و پلاتزر، دنباله خشی [3]

رینولدز  $10^6$  با توزیع یکنواخت دما روی سرتاسر بالواره در نظر گرفت و اثرات دمای سطح را بر روی لایه مرزی و نیروهای آیرودینامیکی بررسی کرد. او پی برد که دمای سطح بالاتر از دمای جریان آزاد تمایل به بی‌ثبات کردن لایه مرزی دارد که منجر به یک گذار و جدایش زودتر جریان می‌شود. همچنین پی برده شد که پسا با شار حرارتی افزایش می‌یابد. در چند تحقیق دیگر نیز ایده اساسی، افزایش پوشش عملیاتی بالواره‌ها بوده است. برای مثال کیم و همکارانش [7] در سال ۲۰۰۳ و بکا و همکارانش [8] در سال ۲۰۰۹، امکان بهبود بازده آیرودینامیکی توسط انتقال حرارت را در بالواره‌های مقیاس کوچک بررسی کردند. کیم و همکاران نشان دادند انتقال حرارت مناسب بر روی بالواره ناکا  $0.12$  می‌تواند باعث بیشتر شدن زاویه واماندگی بالواره شود. بکا و همکاران نیز اثرات حرارتی را روی آیرودینامیک پایای یک ریزپرنده با استفاده از مدل‌های مختلف آشفستگی بررسی کرد. او اشاره کرد که با وجود جریان غالباً آرام، معرفی مدل آشفستگی می‌تواند محاسبات عددی را پایدارتر و به مقادیر تجربی نزدیک‌تر کند.

آنچه در اینجا اهمیت دارد این است که این تحقیق‌ها اثر انتقال حرارت را برای بالواره‌ها در جریان پایا که در مورد بال‌های ثابت هستند، بحث کرده‌اند؛ اما آیرودینامیک بالواره‌ها، خصوصاً هنگام مطالعه حرکت‌های نوسانی مهم به نظر می‌رسد. دنیس اف هینز و همکارانش [9] در سال ۲۰۱۳ از قضاوت نتایج بر روی بالواره‌ها در حالت پایا نتیجه گرفتند که ممکن است اثرات حرارتی بر روی آیرودینامیک بالواره‌های نوسانی در جریان رینولدز پایین نیز مهم باشد. آنها انتظار داشتند که گرمایش بر روی لزجت و در نتیجه نیروهای اصطکاکی در لایه مرزی آرام اثر بگذارد. آنها اثر انتقال حرارت را بر روی عملکرد آیرودینامیکی حالت ایستا (Static) در رینولدز  $3000$ ، فراز و فرود در رینولدز  $20000$  و پیچ یک بالواره ناکا  $0.12$  در رینولدز  $3000$  بررسی کردند. در حالت ایستا با افزایش دما از  $300$  به  $400$  کلون در سرتاسر بالواره نسبت به

جونز، دورینگ و پلاتزر [4] در سال ۱۹۹۸ به‌طور آزمایشگاهی نشان دادند که گردابه‌های بالواره نوسانی با حرکت فراز و فرود بسته به فرکانس و دامنه نوسان می‌تواند به هر سه شکل پسازا، رانشی و یا حتی خشی در آید.

گوئررو [5] در سال ۲۰۰۹ اثر انحنا را روی عملکرد آیرودینامیکی یک بالواره نوسانی بررسی کرد و به این نتیجه رسید که انحنا تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی ضریب برآ دارد ولی بر روی ضریب رانش و بازده پیشران تأثیر کمی دارد. بر اساس این مشاهدات ادعا کرد که عمدتاً نیروی رانش وابسته به پارامترهای نوسانی است در حالی که برآ به پارامترهای هندسی وابسته است.

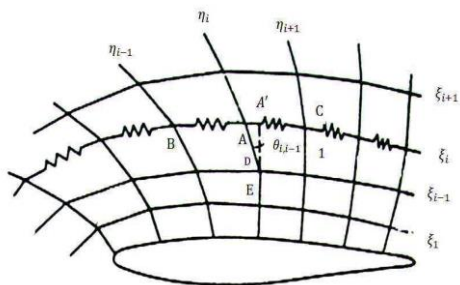
انگیزه تلاش‌های تحقیق اخیر در آیرودینامیک اعداد رینولدز پایین به جهت اهمیت وسایل هوایی ریز پرنده می‌باشد. بالا بردن برآ، کاهش پسا و در نتیجه افزایش پوشش عملیاتی بالواره‌های این وسایل همواره مورد تحقیق پژوهشگران بوده است. روش‌های شناخته شده خوبی برای بهبود این مشخصات بالواره شامل بهینه‌سازی شکل بالواره، بالچه‌های لبه حمله (Flaps) و فرار، وجود دارد. تأثیر پارامترهای مختلف مانند سینماتیک عملیاتی، بهینه‌سازی شکل بال و عدد رینولدز در تحقیق‌های متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است. ولی تاکنون توجه کمی به شرایط عملیاتی حرارتی خصوصاً برای حالت جریان ناپایا شده است. به هر حال، در تحقیق‌های پیشین اهمیت انتقال حرارت در جریان پایا بیان شده است. تعدادی از این بررسی‌ها روی پیش‌بینی مشخصات لایه مرزی، پایداری و تأخیر گذار به وسیله گرمای سطح بالواره‌ها تحت شرایط حالت پایدار متمرکز شده‌اند. برای مثال نورتون [6] در سال ۱۹۷۳ یک بالواره گرم‌شده ناکا  $0.12$  را در

مشخصات سیال با دما، مقدار ویسکوزیته دینامیکی و ضریب نفوذ حرارتی به ترتیب با فرمول ساترلند (Sutherland) و اوکن (Eucken) ارزیابی می‌شوند.

### شبکه‌های دینامیکی و معادلات حاکم

شبکه‌های دینامیکی در مسائلی که هندسه تغییر می‌کند و یا جسم حرکت می‌کند مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوع شبکه‌بندی، شبکه در هر لحظه با حرکت بالواره اصلاح می‌شود. شبکه‌های دینامیکی علاوه بر کارایی و کارآمدی در دقت روش‌های عددی، حافظه کامپیوتر و زمان حل برنامه (نسبت به تولید مجدد شبکه) را نیز کاهش می‌دهند. در شبکه‌های دینامیکی به منظور مدل‌کردن تغییر حرکت‌ها در مرز از تکنیک فنرهای خطی کششی [12] و خمشی [13] استفاده می‌شود. در این روش که متداول‌ترین روش حرکت دادن شبکه المانی می‌باشد، هر کدام از اضلاع بین دو گره در شبکه به صورت موهومی به فنری با سفتی متناسب با عکس فاصله بین هر گره تبدیل می‌شود، به طوری که خطوط با طول بیشتر، دارای سفتی کمتر و خطوط با طول کمتر، سفتی بیشتر خواهند داشت. در کار حاضر برای شبیه‌سازی حرکت نوسانی بالواره از این تکنیک استفاده شده است [14].

در ادامه روابط مربوط به فنرهای خطی و شبکه‌های دینامیکی از مرجع [15] آورده شده است. در شکل (۶) نمونه‌ای از شبکه فنری نشان داده شده است.



شکل ۶ نمونه‌ای از شبکه محاسباتی با فنرهای خطی

دمای جریان آزاد، ضریب پسای متوسط تا ۶/۷ درصد افزایش یافت. در مورد حرکت فراز و فرود، مقدار متوسط ضریب پسا با افزایش اختلاف دمای سطح و جریان آزاد میل به افزایش نشان داد. در مورد حرکت پیچ، مقدار متوسط و دامنه ضریب پسا و برآ با افزایش اختلاف دمای سطح و جریان آزاد کاهش یافت؛ بنابراین در مورد بررسی آنها هیچ بهبودی در عملکرد آیرودینامیکی بالواره‌های مطرح شده، به وجود نیامد. قابل توجه است که در مورد حرکت پیچ بررسی شده توسط آنها ضریب پسا با افزایش دما کاهش یافت اما در همان زمان ضریب برآ کاهش بیشتری را نشان داد که منجر به کاهش نسبت برآ به پسا شد.

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد تأثیر پدیده انتقال حرارت بر روی عملکرد آیرودینامیکی بالواره‌های ساکن بسیار مهم بوده است. به نظر می‌رسد این پدیده بر روی بالواره‌های نوسانی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد، با وجود این در تحقیق‌ها به این نکته کمتر پرداخته شده است. در تنها مقاله ذکر شده توسط دنیس اف هینز و همکارانش [9] در سال ۲۰۱۳ اثر گرمایش سطح بالواره ناکا ۰۰۱۲ در حرکت‌های نوسانی مطرح شده است. هدف از تحقیق اخیر، بررسی اثر انتقال حرارت بر روی عملکرد آیرودینامیکی بالواره‌های نوسانی با حرکت فراز و فرود در رژیم جریان اعداد رینولدز پایین با تکیه خاص بر ضرایب برآ و پسای بالواره‌ها می‌باشد. در این تحقیق بالواره‌ها هم در حالت گرمایشی و هم در حالت سرمایشی مورد مطالعه قرار می‌گیرند تا بهبودی برای عملکرد آیرودینامیکی آنها حاصل شود. همچنین در مواردی گردابه‌های لبه فرار در حالت‌های مختلف حرارتی تحلیل می‌شوند. اثر توأمان ضخامت و همچنین انحنا نیز در حضور انتقال حرارت مورد بحث قرار می‌گیرد. معادلات ناویراستوکس نوسانی تراکم‌پذیر توسط یک روش عددی برمبنای حجم محدود و الگوریتم پیمپل تراکم‌پذیر با شبیه‌سازی عددی توسط شبکه دینامیکی و استفاده از نرم‌افزار متن باز اپن فم (Open Foam) حل می‌شوند. با در نظر گرفتن تغییر [10,11]

$$K = \frac{\pi * f * c}{U_{\infty}} = \frac{\omega * c}{U_{\infty}} \quad (7)$$

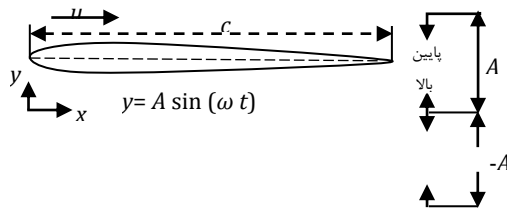
$$H = \frac{A}{c} \quad (8)$$

با قرار دادن سرعت جریان آزاد در رابطه (7) و فرض معلوم بودن فرکانس کاهیده می‌توان سرعت زاویه‌ای نوسان  $\omega$  را محاسبه نمود. با داشتن سرعت فوق و دامنه نوسان و قرار دادن آنها در رابطه (9)، معادله حرکت به دست می‌آید که این معادله به بال و ناحیه متحرک اطراف آن اعمال می‌شود.

$$y(t) = A \sin(\omega * t) \quad (9)$$

$$Y(\tau) = H \sin(2k\tau) \quad (10)$$

رابطه (10)، معادله حرکت بی بعد است که در آن  $\tau = \frac{tU_{\infty}}{c}$  زمان بی بعد می‌باشد. شکل (7)، شماتیک حرکت فراز و فرود خالص را نشان می‌دهد که در آن  $c$  طول وتر بالواره می‌باشد.



شکل 7 شماتیک حرکت فراز و فرود خالص

با معلوم بودن معادله حرکت، به منظور شبیه‌سازی عددی باید معادلات حاکم بر جریان حل شوند. معادلات حاکم بر جریان بیان‌کننده قوانین بقای جرم، حرکت و انرژی می‌باشند. روش استخراج این معادلات در منابع گوناگون مطرح شده است [16,17]. برای تحقیق اخیر میدان جریان در اطراف بالواره توسط معادله پیوستگی، معادلات ناوراستوکس تراکم‌پذیر و معادله انرژی حل شده است. معادلات (11-13)

در شکل (6)، نحوه فنر زنی و ایجاد شبکه با استفاده از روش فنر خطی قابل مشاهده است. بردار  $\vec{e}_{ij}$  که گره  $i$  را به گره  $j$  وصل می‌کند به وسیله رابطه (1) بیان می‌شود:

$$\vec{e}_{ij} = x_j - x_i \quad (1)$$

که طول این بردار برابر است با:

$$L_{ij} = \sqrt{e_{ij} \cdot e_{ij}} \quad (2)$$

$$\dot{l}_{ij} = \frac{e_{ij}}{L_{ij}} \quad (3)$$

$$\Delta = (m_j - m_i) \cdot \vec{l}_{ij} \quad (4)$$

که در معادله (4)،  $\Delta$  تغییر مکان گره‌های  $i$  و  $j$  در راستای بردار اتصال دو نقطه را نشان می‌دهد. به علاوه می‌توان سفتی فنر خطی برای هر ضلع را از رابطه (5) به دست آورد. در نتیجه نیروی ایجاد شده روی گره  $i$  ام در راستای بردار  $\vec{l}_{ij}$  اعمال می‌شود که به صورت رابطه (6) می‌باشد.  $k_{ij}$  سفتی فنری است که بین دو گره  $i$  و  $j$  قرار دارد و متناسب با عکس بردار ضلع می‌باشد.

$$k_{ij} = \frac{1}{L_{ij}} \quad (5)$$

$$f_{ij}^{edge} = k_{ij}(m_j - m_i)\vec{l}_{ij} \cdot \vec{l}_{ij} = -f_{ji}^{edge} \quad (6)$$

با استفاده از این روش سودمند می‌توان تغییر شکل‌های محلی المان را کنترل کرد. اگر طول المانی زیاد شد، سفتی آن زیاد می‌شود که منجر به اعمال نیروی بیشتری به این المان می‌گردد و باعث جمع شدن آن می‌شود. این امر کمک زیادی به تطبیق دادن شبکه می‌کند. دو عدد از اعداد بی بعد حاکم بر جریان، فرکانس کاهیده  $K$  و دامنه نوسان بی بعد  $H$  می‌باشد که به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

ترمودینامیکی  $\rho$ ،  $p$  و  $T$  نیز از طریق معادله گاز ایده آل مرتبط شده اند [18].

$$h = c_p T \quad (15)$$

$$p = \rho R T \quad (16)$$

که  $R$  و  $T$  به ترتیب ثابت گاز و دما می باشند.

### ویژگی های سیال

ویژگی های سیال عموماً با تغییر دما ثابت نیستند. مطالعه مشخصات سیال در دماهای مختلف در مرجع های گوناگون ذکر شده است [18]. با فرض یک تغییر حالت هم فشار، چگالی هوا با افزایش دما کاهش می یابد. عدد پرانتل  $Pr = \frac{\mu c_p}{k_T}$  [18] نیز کمی کاهش می یابد. گرمای مخصوص  $c_p$  تقریباً ثابت مانده و لزجت دینامیکی  $\mu$  و ضریب هدایت حرارتی  $k_T$  افزایش می یابد.

لزجت سینماتیکی و دینامیکی از طریق رابطه  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  [18] مرتبط می شوند. هنگامی که چگالی کاهش و لزجت دینامیکی افزایش می یابد، لزجت سینماتیکی نیز افزایش خواهد یافت. ارتباط بین ضریب هدایت حرارتی  $k_T$  و ضریب نفوذ حرارتی  $\alpha_T$  نیز با رابطه  $\alpha_T = \frac{k_T}{\rho c_p}$  [18] بیان می شود که همان رفتار لزجت سینماتیکی سیال را نشان می دهد.

از ارزیابی مشخصات فیزیکی هوا نتیجه گرفته می شود که تغییر ویژگی های سیال در دماهای گوناگون ذاتی است و باید در محاسبات در مدل شبیه سازی به کار برده شود. در تحقیق اخیر، مدل های زیر برای بیان این تغییرات استفاده شده است [18-20]:

$$C_p = const = C_p(300K) = 1007 J/kgK \quad (17)$$

به ترتیب بیان کننده معادلات فوق می باشند [9].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{k_T}{C_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + \frac{Dp}{Dt} \quad (13)$$

که در آنها  $i=1,2$  به ترتیب بیانگر مختصات  $x$  و  $y$  هستند و  $u_i$  سرعت در جهت  $i$  است.  $k_T$  و  $C_p$  به ترتیب ضریب هدایت حرارتی و گرمای مخصوص می باشند. انتالپی برابر  $h = e + \frac{p}{\rho}$  است که در آن  $e$ ،  $p$  و  $\rho$  به ترتیب بیان کننده انرژی درونی، فشار و چگالی است. در معادله انرژی مشتق کل (Total derivate) فشار  $\frac{Dp}{Dt}$  است و کار انجام شده به وسیله فشار را محاسبه می کند. انرژی جنبشی تبدیل شده به حرارت توسط اتلاف لزج در مقایسه با ترم های دیگر در معادله انرژی کوچک است و از آن صرف نظر شده است. سیال نیوتنی فرض شده و بخش لزج تانسور تنش  $\tau_{ij}$  برای یک سیال نیوتنی به صورت زیر تعریف می شود [9]:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \text{div } u \right) \quad (14)$$

که  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی سیال و  $\delta$  نماد کرونیکر (Kronecker) است. جریان کاملاً آرام فرض شده و از نیروی گرانش چشم پوشی شده است. به هر حال با در نظر گرفتن اختلاف دما بین سطح و جریان آزاد، ممکن است نیروهای گرانش بر جریان اثرگذار باشد و منجر به انتقال حرارت به صورت جابه جایی طبیعی شوند که در آن صورت مدل بالا برای حل مسئله حاضر مناسب نخواهد بود. با فرض این که سیال گاز ایده آل باشد، انتالپی مخصوص با دما از طریق معادله حالت کالریک (15) مرتبط خواهد شد [18]. متغیرهای حالت

که در آن  $U_g$  سرعت شبکه می‌باشد و  $\varphi$  می‌تواند هر متغیر مانند  $u$ ،  $v$  یا  $h$  باشد. معادله (۲۱) توسط روش حجم محدود گسسته می‌شود و توسط الگوریتم فشار مینا حل می‌شود.

جمله‌های نفوذ در این مطالعه براساس یک طرح تفاضل مرکزی مرتبه دوم و جمله‌های جابه‌جایی با استفاده از یک روش تفاضل بالادست مرتبه دوم محدود گسسته‌سازی شده‌اند. همچنین از روش کاملاً ضمنی اولر (Euler) به منظور گسسته‌سازی جمله زمانی استفاده شده‌است. انتگرال‌گیری زمانی از ترم‌های جابه‌جایی و پخش، می‌تواند به روش ضمنی و صریح انجام شود که طرح ضمنی به دلیل شرط پایداری نسبت به طرح صریح برتری دارد.

در این تحقیق معادلات گسسته‌شده جریان با استفاده از الگوریتم پیمپل (PIMPL) تراکم‌پذیر حل می‌شوند. روش پیمپل مخفف روش ضمنی فشار مینا برای معادلات وابسته به فشار است که ترکیبی از الگوریتم سیمپل (SIMPLE) و پیزو (PISO) می‌باشد. الگوریتم پیمپل از الگوریتم سیمپل به عنوان حلقه خارجی جدید در الگوریتم پیزو استفاده می‌کند. در این تحقیق تعداد حلقه‌های خارجی، یک، و تعداد حلقه‌های داخلی، سه، در نظر گرفته شده‌است که در واقع الگوریتم حل به الگوریتم پیزو با سه مرتبه تصحیح تبدیل می‌شود. به این منظور در نرم‌افزار این فم از حلگر رو پیمپل دایم فویم (Rho Pimple Dym Foam) برای شبیه‌سازی‌های تحقیق پیش‌رو استفاده شده‌است. در این تحقیق ضرایب پسا و برآ به ترتیب از روابط (۲۲) و (۲۳) به دست می‌آیند [17]:

$$C_d = \frac{D}{1/2(A_{ref}\rho_{\infty}U_{\infty}^2)} \quad (22)$$

$$C_L = \frac{L}{1/2(A_{ref}\rho_{\infty}U_{\infty}^2)} \quad (23)$$

ضریب برآ و ضریب پسای متوسط نیز از روابط

$$\mu_T = \frac{A_s \sqrt{T}}{1 + \frac{T_s}{T}} \quad (18)$$

$$k_T(T) = \mu(T) C_{Eucken} \quad (19)$$

گرمای مخصوص  $c_p$  با دما تغییر کوچکی نشان می‌دهد، بنابراین ثابت فرض شده‌است. لزجت دینامیکی با مدل ساترلند (Sutherland) در معادله (۱۸) [19]، با ضرایب  $A_s$  و  $T_s$  که به ترتیب برای هوا برابر  $(\frac{kg}{ms\sqrt{K}})^{-6} \times 10^{-6} \times 1/4792$  و ۱۱۶ کلوین می‌باشند، ارزیابی شده‌است. مدل ساترلند یک مدل تجربی است که طبق آن لزجت دینامیکی تابعی از دما می‌باشد. این مدل توافق خوبی را با مشخصات فهرست‌شده هوا در مراجع گوناگون مانند اینکروپرا و دوئیت [18] نشان می‌دهد. ضریب هدایت حرارتی سیال با مدل اوکن (Eucken) [20] سنجیده شده‌است که ضریب هدایت حرارتی را توسط یک ثابت مشخص که ثابت اوکن نام دارد به لزجت دینامیکی ارتباط می‌دهد.  $C_{Eucken}$  برای مولکول‌ها و ترکیبات گازی با بیش از یک اتم، برای مثال هوا، از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_{Eucken} = c_v \left( 1.32 + \frac{1.77 R}{c_p} \right) \quad (20)$$

که در آن  $c_v$  گرمای مخصوص در حجم ثابت است که از طریق رابطه  $c_p = c_v + R$  [18] با  $c_p$  و  $R$  مرتبط می‌شود.

### گسسته‌سازی معادلات حاکم بر جریان

معادلات اساسی که بقای جرم، مومنتم و انرژی را بیان می‌کند، در حالت برداری و مستقل از سیستم مختصات، به صورت زیر بیان می‌شوند [14]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \nabla \cdot (\rho\varphi(U - U_g)) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\varphi) + S_{\varphi} \quad (21)$$



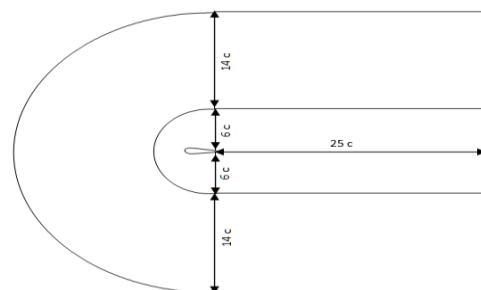
زیر محاسبه می‌شوند:

$$\bar{C}_L = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} C_L dt \quad (24)$$

$$\bar{C}_d = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} C_d dt \quad (25)$$

### شبکه محاسباتی و دینامیکی

در تحقیق حاضر یک شبکه از نوع C برای مدل کردن جریان اطراف بالواره به کار برده شده است. انتخاب شبکه نوع C نسبت به انواع دیگر مانند H و O به دلیل ساختار هماهنگ شبکه با بالواره، به کارگیری شبکه لایه مرزی و تولید سلول‌های مناسب در پشت بالواره بوده است. زیرا دیگر انواع شبکه، هنگام حرکت شبکه از کیفیت آنها کاسته می‌شد و نتایج خوبی را ارائه نمی‌دادند. طرح کلی شبکه نوع C استفاده شده در پژوهش حاضر در شکل (۸) نشان داده شده است. ناحیه محاسباتی در راستای عمود بر بالواره ۲۰ برابر وتر بالواره و در پشت بالواره ۲۵ برابر وتر، انتخاب شده است، تا اثرات ناشی از نوسان بالواره به مرزها نرسد. همانطور که در شکل (۸) دیده می‌شود، ناحیه محاسباتی در راستای عمود بر بالواره به دو قسمت تقسیم شده است که قسمت نزدیک بالواره به همراه بالواره (قسمت داخلی) در قسمت دیگر (قسمت خارجی) نوسان می‌کند.



شکل ۸ شبکه استفاده شده از نوع C در اطراف بالواره

علت این چیدمان شبکه، حفظ کیفیت شبکه اطراف بالواره در حین حرکت نوسانی می‌باشد. به عبارت دیگر هنگامی که حرکت نوسانی به خود بالواره اعمال می‌شود، سلول‌های اطراف بالواره که بسیار ریز می‌باشند در حین نوسان در حالت نامناسبی قرار می‌گیرند و جواب‌های غیرقابل قبولی در روند حل مسئله ارائه می‌دهند و حتی امکان پاشش شبکه نیز وجود دارد. در صورتی که اگر بالواره خود به همراه یک ناحیه مناسب (به اندازه کافی دور از بالواره که سلول‌ها بزرگ شوند و در نتیجه حرکت ناحیه داخلی درون ناحیه خارجی، شبکه با مشکلی روبه‌رو نشود) درون ناحیه خارجی نوسان کند، سلول‌های اطراف بالواره هیچ تغییری نمی‌کنند و حل دچار خطا نخواهد شد. ضمن این که در این حالت امکان پاشش شبکه به کمترین مقدار خود خواهد رسید. خاطر نشان می‌شود که حفظ کیفیت شبکه و جلوگیری از پاشش شبکه، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در شبکه‌های دینامیکی می‌باشد. برای نیل بدین منظور در نرم‌افزار اپن فم از روش شبکه حجم محدود متحرک جسم صلب (Solid Body Motion Fv Mesh) به همراه حرکت نوسانی خطی (Oscillating Linear Motion) استفاده شده است. برای بررسی دو روش شبکه دینامیکی اشاره شده، شبیه‌سازی انجام شده است. شکل (۹) نمودار ضریب پسای بالواره ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰۰۰۰ و شرایط گرمایشی (دمای سطح بالواره ۴۰۰ و دمای جریان آزاد ۳۰۰ کلوین) را برای هنگامی که یک بار نوسان به بالواره و بار دیگر به ناحیه اطراف آن، اعمال می‌گردد، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هنگامی که نوسان به بالواره اعمال شده است نوسانات زیادی در ضریب پسا به وجود آمده است. در این شکل  $\alpha$  دوره نوسان حرکت می‌باشد.

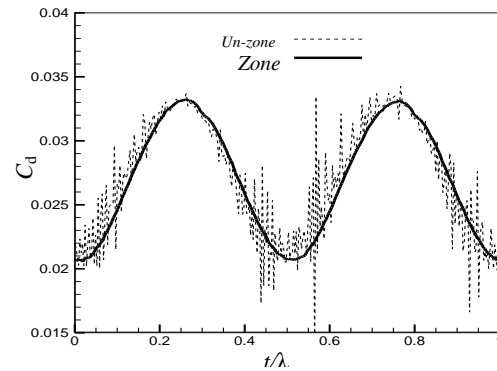


ثابت برای دما به کار برده شده است. در مرز ورودی سرعت جریان آزاد به عنوان شرط مرزی فیزیکی اعمال و فشار با گرادیان صفر محاسبه می شود، به عبارت دیگر فشار به عنوان شرط مرزی عددی از درون ناحیه محاسباتی برون یابی می شود. در مرز خروجی، برای فشار از شرط مرزی فشار ثابت محیط و برای سرعت، گرادیان صفر انتخاب می شود که سرعت از درون ناحیه محاسباتی برون یابی می شود. در مرزهای بالا و پایین از شرط مرزی لغزشی (Slip) استفاده شده است.

### نتایج

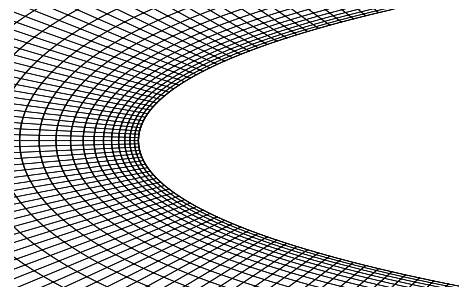
در این قسمت، نتایج اثر انتقال حرارت بر روی دو بالواره متقارن و انحنادار در حالت نوسانی با حرکت فراز و فرود در محدوده اعداد رینولدز جریان لایه‌ای، بر روی ضرایب برآ و پسای بالواره‌ها ارائه می شود.

نکته‌ای که قبل از بررسی نتایج باید به آن توجه نمود این است که، از آنجا که شروع حل در این شبیه‌سازی از حالت سکون است، بنابراین در نوسانات ابتدایی نتایج به دست آمده برای ضرایب آیرودینامیکی به حالت شبه پایایی خود نمی‌رسند و داده برداری بعد از گذشت چند دوره نوسان کامل باید صورت پذیرد. به منظور محاسبه تعداد دوره لازم برای رسیدن به یک حرکت نوسانی منظم (تکرارشونده)، ابتدا شرایط مسئله دنیس اف هینز و همکارانش [9] برای حرکت نوسانی فراز و فرود بالواره ناکا ۰۰۱۲ یعنی عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، عدد ماخ تقریباً برابر با ۰/۰۰۱، فرکانس کاهیده ۳/۹۳، دامنه نوسان بی بعد ۰/۰۱۲۵ و دمای جریان آزاد برابر با ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته می شود و برای حالت گرمایشی دمای سطح بالواره برابر با ۳۵۰ کلوین، مسئله شبیه‌سازی می شود. برای شرایط کاری فوق، در تحقیق اخیر از دوره ۶ به بعد، حرکت نوسانی به حالت منظم خود می‌رسد. شکل (۱۳) تغییرات ضرایب برآ و پسای به دست آمده در این شرایط را در

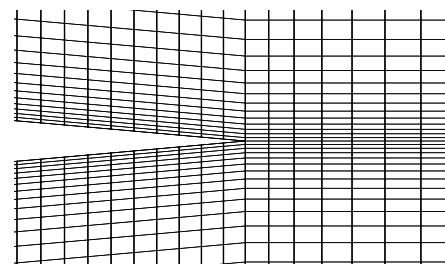


شکل ۹ ضریب پسای بالواره ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰۰۰۰ و دمای سطح بالواره ۴۰۰ کلوین

در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) ساختار شبکه بندی اطراف بالواره نشان داده شده است. مناسب بودن شبکه‌های ریز اطراف بالواره به وضوح در این شکل‌ها دیده می شود.



شکل ۱۰ شبکه بندی در لبه جلویی بالواره



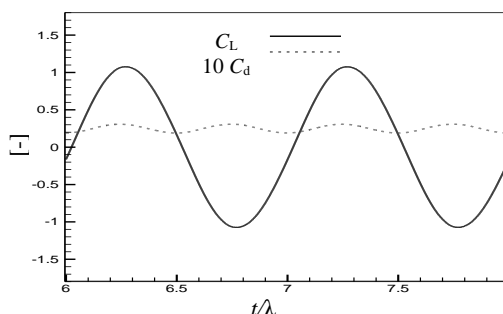
شکل ۱۱ شبکه بندی در لبه انتهایی بالواره

### شرایط مرزی

بر روی بالواره شرط عدم لغزش (No Slip) از نوع سرعت دیواره متحرک (Moving wall velocity) برای سرعت، شرط گرادیان صفر برای فشار و شرط دما

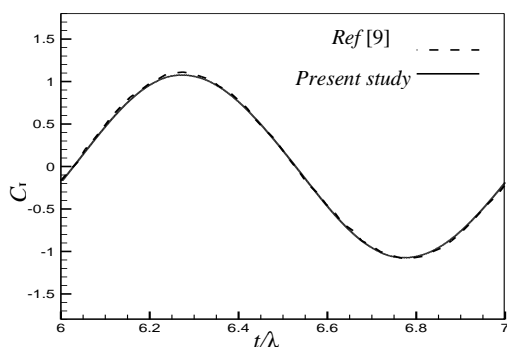
دو دوره (۶ و ۷) نشان می‌دهد.

برای بررسی صحت تحقیق اخیر در حالت نوسانی، نتایج شبیه‌سازی با نتایج دنیس اف هینز و همکارانش [9] مورد مقایسه قرار گرفته‌است که در آن بالواره ناکا ۰۰۱۲ در شرایط جریان آزاد با عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، عدد ماخ تقریباً ۰/۰۰۱، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنه نوسان بی بعد ۰/۰۱۲۵ قرار دارد و دمای جریان آزاد ۳۰۰ و دمای سطح بالواره ۳۵۰ کلوین می‌باشد. شکل‌های (۱۴ و ۱۵) به ترتیب ضرایب برآ و پسای کار آنها را در مقایسه با نتایج تحقیق اخیر نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها قابل مشاهده است، شبیه‌سازی اخیر دقت بسیار بالایی با نتایج کار دنیس اف هینز و همکارانش دارد که نشان‌دهنده صحیح بودن تحقیق پیش‌رو است.

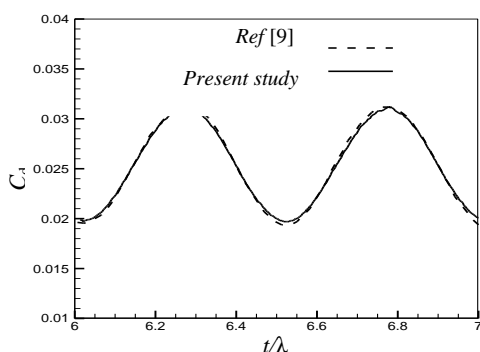


شکل ۱۲ هم‌گرایی دوره نوسانی، بالواره ناکا ۰۰۱۲ در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنه نوسان بی بعد ۰/۰۱۲۵، دمای جریان آزاد ۳۰۰ و دمای سطح بالواره ۳۵۰ کلوین

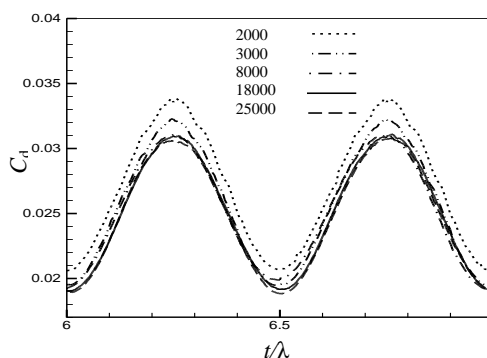
بررسی اثر ریزکردن شبکه محاسباتی در روش حجم محدود برای بالواره ناکا ۰۰۱۲ و همان شرایط قبل صورت پذیرفته‌است. شبکه‌هایی با تعداد سلول محاسباتی در حدود ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۱۸۰۰۰، ۲۵۰۰۰ و ۳۷۰۰۰ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. شکل (۱۳) تغییرات ضریب پسا را در همان شرایط شکل (۱۲) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود با ریزتر شدن شبکه از ۲۵۰۰۰ تا ۳۷۰۰۰ با وجود افزایش زیاد هزینه محاسبات، نتیجه محاسبات تغییر چشم‌گیری ندارد. بنابراین به منظور بررسی نتایج از شبکه‌هایی با تعداد سلول ۲۵۰۰۰ استفاده شده‌است.



شکل ۱۴ اعتبارسنجی منحنی ضریب برآ، بالواره ناکا ۰۰۱۲ در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنه نوسان بی بعد ۰/۰۱۲۵، دمای جریان آزاد ۳۰۰ و دمای سطح بالواره ۳۵۰ کلوین



شکل ۱۵ اعتبارسنجی منحنی ضریب پسا، بالواره ناکا ۰۰۱۲ در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنه نوسان بی بعد ۰/۰۱۲۵، دمای جریان آزاد ۳۰۰ و دمای سطح بالواره ۳۵۰ کلوین



شکل ۱۳ استقلال از شبکه، بالواره ناکا ۰۰۱۲ در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنه نوسان بی بعد ۰/۰۱۲۵، دمای جریان آزاد ۳۰۰ و دمای سطح بالواره ۳۵۰ کلوین

با نگاه در شکل (۱۶) این نکته نیز دیده می‌شود که شکل سینوسی منحنی ضریب برآ اثر سرمایش و گرمایش اندکی تغییر کرده‌است.

شکل‌های (۱۷ و ۱۸) به ترتیب ضرایب پسای لحظه‌ای و متوسط را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، اثر انتقال حرارت بر روی ضریب پسا بسیار بیشتر از ضریب برآ بوده‌است. شکل (۱۷) نشان می‌دهد که ضریب پسای لحظه‌ای با افزایش دما افزایش و با کاهش دما کاهش می‌یابد. شکل (۱۸) نیز گویای اثر قابل ملاحظه انتقال حرارت بر روی ضریب پسای متوسط در حالت نوسانی می‌باشد. با افزایش ۵۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره نسبت به دمای جریان آزاد، ضریب پسای متوسط ۱۰/۷ درصد و با افزایش ۱۰۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره، ضریب پسای متوسط تقریباً ۲۰/۲ درصد افزایش یافته‌است، این درحالی است که کاهش ۵۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره نسبت به دمای جریان آزاد، ضریب پسای متوسط را ۱۲/۹۸ درصد کاهش و کاهش ۱۰۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره ضریب پسای متوسط را ۳۸/۹۱ درصد کاهش داده‌است. شکل‌های ضریب پسا، نشان می‌دهد که سرمایش اثر بیشتری بر روی ضریب پسا نسبت به گرمایش داشته‌است. روند افزایشی و کاهش‌ی ضریب پسای ناشی از انتقال حرارت در حالت نوسانی می‌تواند هم به‌خاطر افزایش و کاهش لزجت دینامیکی باشد و هم به الگوی گردابه‌ها در لبه انتهایی مربوط باشد. به‌طور کلی پسا شامل دو جزء شناخته‌شده پسای فشاری و پسای لزجی می‌باشد. افزایش پسای لزجی با بالا رفتن دمای سطح و با تغییر در ویژگی‌های سیال در لایه مرزی لزج متناسب است. برای سیالات نیوتنی، تنش مماسی لزج، متناسب با گرادیان سرعت نرمال به دیواره و لزجت دینامیکی می‌باشد. رابطه زیر بیان یک‌بعدی این ارتباط را نشان می‌دهد:

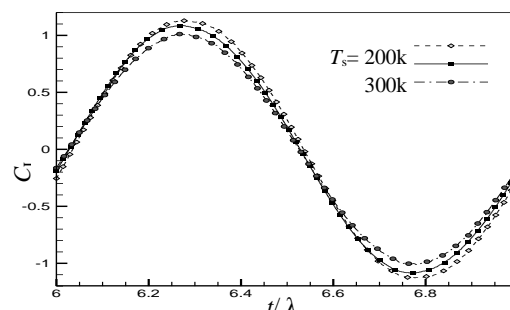
$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial n} \quad (26)$$

در این تحقیق ابتدا اثر انتقال حرارت را بر روی بالواره نوسانی با حرکت فراز و فرود هم در حالت گرمایشی و هم در حالت سرمایشی بررسی خواهیم کرد. برای این منظور بالواره ناکا ۰۰۱۲ در همان شرایط قبلی و برای دمای جریان آزاد برابر با ۳۰۰ کلوین و دماهای سطح ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ شبیه‌سازی شده‌است. شکل (۱۶) ضرایب برآی لحظه‌ای را (به‌علت نزدیک بودن نمودارها و خوانابودن آن) فقط برای دماهای سطح ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کلوین برای یک دوره نوسان نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود سرمایش، ضریب برآی لحظه‌ای ماکزیمم را اندکی افزایش داده‌است، درحالی‌که گرمایش ضریب برآی ماکزیمم را اندکی کاهش داده‌است، که این نشان از اثر مثبت سرمایش دارد. همان‌طور که در جدول (۱) دیده می‌شود با افزایش دما تا ۴۰۰ کلوین ضریب برآی ماکزیمم، تقریباً ۷/۵ درصد کاهش و با کاهش دما به ۲۰۰ کلوین، ضریب برآی ماکزیمم تقریباً ۳/۸ درصد افزایش داشته‌است. ذکر این نکته مهم است که چون بالواره متقارن است ضریب برآی متوسط در تمام حالات صفر می‌باشد.

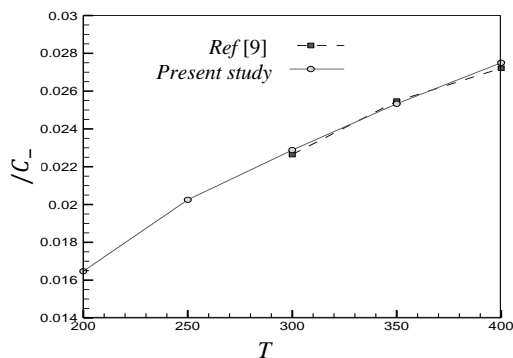
جدول ۱ مقادیر ضریب برآی بیشینه در دماهای سطح مختلف

بالواره ناکا ۰۰۱۲

Ts=400 (K)	Ts=350 (K)	Ts=300 (K)	Ts=250 (K)	Ts=200 (K)	CL.M
۱/۰۱۱۵	۱/۰۵۶۹	۱/۰۸۷۵	۱/۱۱۰۶	۱/۱۲۸۶	



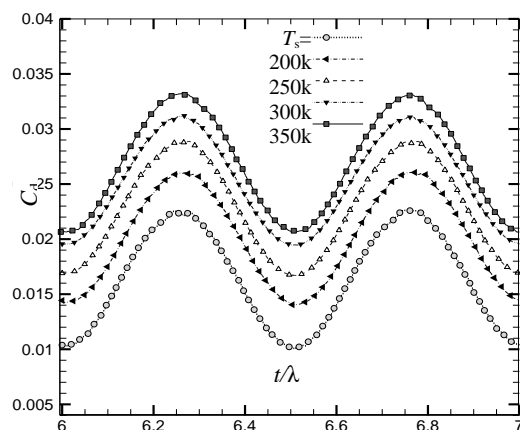
شکل ۱۶ ضریب برآ در دماهای سطح مختلف بالواره ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنه نوسان بی‌بعد ۰/۱۲۵



شکل ۱۸ مقادیر ضریب پسای متوسط در دماهای سطح مختلف بالواره ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنه نوسان بی بعد ۰/۱۲۵

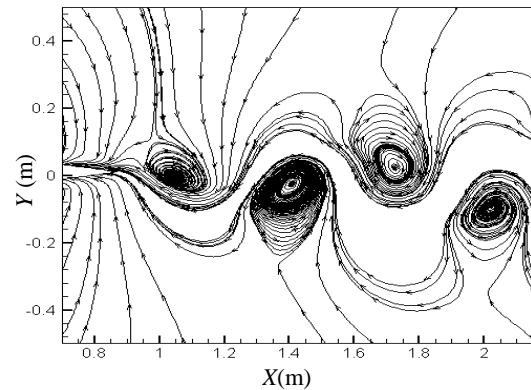
برای نمایش اثر انتقال حرارت بر الگوی گردابه‌ها در لبه انتهایی، شکل‌های (۱۹، ۲۰، ۲۱) الگوی گردابه‌ها را در یک زمان خاص ( $t/\lambda = 6.25$ ) نشان می‌دهند. همان‌طور که در این سه شکل دیده می‌شود، گردابه‌های رهاشده پادساعتگرد از لبه پایینی در همه حالت‌ها پایین‌تر از گردابه‌های رهاشده ساعتگرد از لبه بالایی می‌باشند. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، این حالت بر روی بالواره نیروی پسا تولید می‌کند. همان‌طور که در شکل (۲۱) نیز دیده می‌شود، ضرایب پسای متوسط نیز در همه حالت‌ها مثبت می‌باشد. همچنین فاصله عمودی بین مراکز گردابه‌ها با افزایش دمای سطح بالواره از ۲۰۰ به ۴۰۰ کلوین، بیشتر شده است که طبق گفته وون کارمن و برگز [1]، اگر فاصله عمودی بین ردیف‌ها افزایش یابد، ناحیه سرعت متوسط کمتر (در حالت پسا) و یا ناحیه سرعت متوسط بالاتر (در حالت رانش) افزایش می‌یابد که خود منجر به افزایش نیروی پسا می‌شود. همچنین با افزایش دمای سطح بالواره، جدایش گردابه از لبه انتهایی بالواره به تأخیر افتاده است که وجود این گردابه بر روی انتهای بالواره خود باعث تولید پسای بیشتر خواهد شد.

هنگامی که لزجت دینامیکی  $\mu$  با افزایش دما زیاد می‌شود، بدیهی است که تنش مماسی و ضریب پسا باید افزایش یابد. افزایش دما از ۳۰۰ تا ۴۰۰ کلوین، لزجت دینامیکی  $\mu$  را تقریباً ۶/۲۴ درصد افزایش می‌دهد. کاهش دما از ۳۰۰ به ۲۰۰ کلوین منجر به کاهش ۲/۲۸ درصدی لزجت دینامیکی می‌شود [18]، برای همین اثر، تغییرات ضریب پسا در حالت سرمایشی می‌تواند بیشتر از گرمایشی باشد. همچنین شکل‌های ضریب پسای لحظه‌ای و متوسط نیز نشان می‌دهد که با افزایش دمای سطح بالواره اثر انتقال حرارت بر روی ضریب پسای لحظه‌ای و متوسط کاهش داشته است. این می‌تواند ناشی از این امر باشد که حالت گرمایشی لایه مرزی را ناپایدار می‌کند [6] و چون بالواره در حالت نوسانی نیز می‌باشد، این ناپایداری افزایش می‌یابد و زمان ماند جریان بر روی بالواره برای انتقال حرارت مناسب کاهش می‌یابد. در صورتی که در حالت سرمایشی، لایه مرزی پایدارتر و انتقال حرارت به صورت مناسب‌تری صورت می‌گیرد.

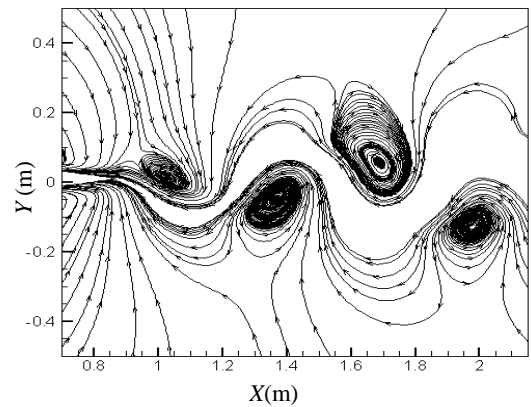


شکل ۱۷ ضریب پسا در دماهای سطح مختلف بالواره ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنه نوسان بی بعد ۰/۱۲۵

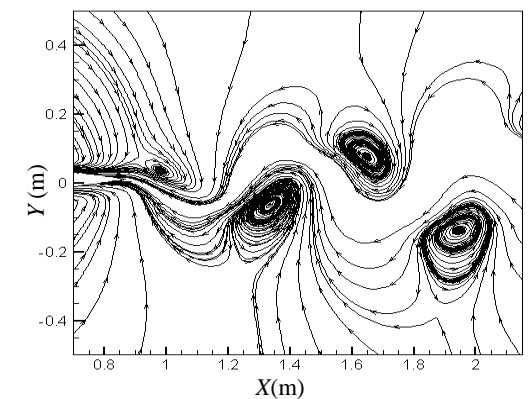
که اگر بالواره در فرکانس و دامنه معینی در حالت بدون انتقال حرارت، تقریباً پسا یا رانش صفر تولید کند (حالت خنثای ذکر شده در مقدمه)، می‌توان با انتقال حرارت، آن را به حالت پسازا یا رانش‌زا تبدیل کرد. برای بیان این مطلب، همان شرایط قبلی را به بالواره اعمال می‌کنیم و فقط فرکانس کاهیده را به دو برابر ( $K = 7.86$ ) افزایش می‌دهیم. شکل‌های (۲۲ و ۲۳) به ترتیب ضریب پسای لحظه‌ای و متوسط را برای دماهای مختلف در این حالت نشان می‌دهند. شکل (۲۳) نشان می‌دهد که در حالت بدون انتقال حرارت (حالتی که دمای سطح بالواره برابر با دمای جریان آزاد یعنی ۳۰۰ کلوین است)، ضریب پسا تقریباً برابر با صفر است که نشان‌دهنده حالت تقریباً خنثای بالواره در این فرکانس از نوسان می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رود، گرمایش باعث افزایش ضریب پسا می‌شود که منجر به تولید پسا می‌گردد و کاهش دما منجر به تولید پسای منفی یا به عبارتی تولید رانش می‌شود. البته چون فرکانس دو برابر شده طبق استدلال قبلی، زمان لازم برای انتقال حرارت مناسب بین بالواره و جریان اطراف به حداقل رسیده و اثر انتقال حرارت در هر دو حالت گرمایشی و سرمایشی تقریباً مشابه بوده و نمودار ضریب پسای متوسط تقریباً خطی شده است. تأثیر انتقال حرارت همان‌طور که از نمودارها برمی‌آید در فرکانس بالاتر نسبت به فرکانس پایین‌تر کمتر بوده است. شکل (۲۴) که نمودار ضریب برآی لحظه‌ای را نشان می‌دهد نیز با همین استدلال قابل بیان است. به عبارتی در فرکانس کاهیده پایین‌تر ( $K = 3.93$ )، ضریب برآی لحظه‌ای ماکزیمم از ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه تقریباً  $10/5$  درصد کاهش داشته است، حال آن‌که این کاهش برای فرکانس بالاتر ( $K = 7.86$ )، تقریباً  $6/5$  درصد بوده است.



شکل ۱۹ گردابه‌های لبه انتهایی بالواره در  $t/\lambda=6.25$  و  $K=3.93$  دمای سطح بالواره برابر ۲۰۰ کلوین



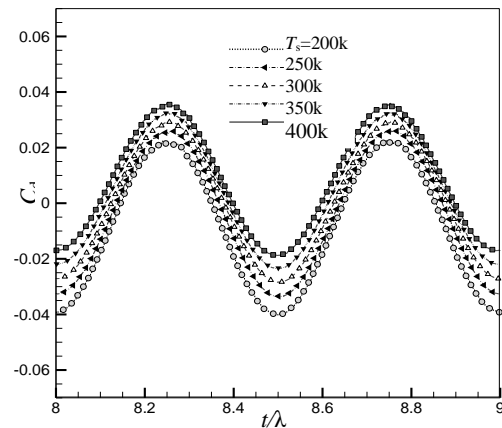
شکل ۲۰ گردابه‌های لبه انتهایی بالواره در  $t/\lambda=6.25$  دمای سطح بالواره برابر ۳۰۰ کلوین



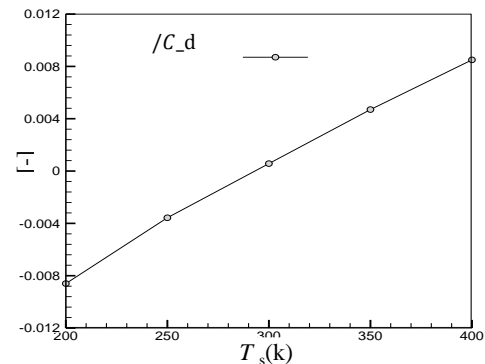
شکل ۲۱ گردابه‌های لبه انتهایی بالواره در  $t/\lambda=6.25$  دمای سطح بالواره برابر ۴۰۰ کلوین

نکته دیگری که از اثر انتقال حرارت بر روی ضریب پسا در حالت نوسانی می‌شود فهمید این است

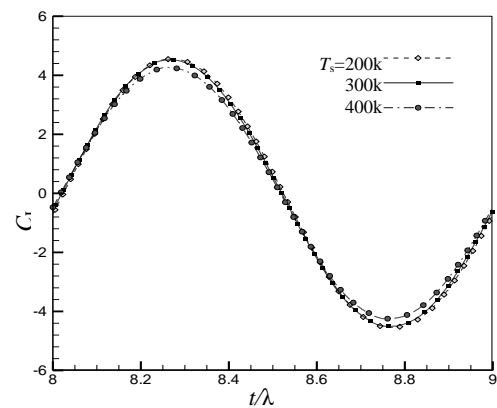
نکته دیگر این که همان‌طور که انتظار می‌رفت افزایش فرکانس ضریب برآ را به مقدار قابل توجهی افزایش داده است. همان‌طور که در شکل (۲۳) دیده می‌شود، ضریب پسای متوسط در حالت بدون انتقال حرارت، تقریباً صفر، در حالت‌های گرمایشی، مقدار ضریب پسا مثبت و در حالت‌های سرمایشی پسا منفی شده است. به عبارتی طبق نکات ذکر شده در مقدمه، در مورد گردابه‌ها توقع داریم که در حالت بدون انتقال حرارت گردابه‌ها تقریباً خنثی، در حالت گرمایشی از نوع پسازا و در حالت سرمایشی از نوع رانش‌زا باشند. البته چون مقادیر ضریب پسا بسیار کوچک است انتظار می‌رود که این تفاوت زیاد محسوس نباشد. برای بررسی این موضوع الگوی گردابه‌ها در لبه انتهایی برای سه حالت ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کلوین بررسی می‌شود. شکل‌های (۲۵، ۲۶ و ۲۷) الگوی گردابه‌ها را برای این سه حالت در یک زمان خاص (مثلاً  $t/\lambda = 6.25$ ) نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در دمای ۳۰۰ کلوین گردابه‌ها در یک راستا قرار دارند و از نوع خنثی می‌باشند. این در حالی است که در دمای ۲۰۰ درجه، گردابه ره‌اشده از پایین که پادساعتگرد است، اندکی بالاتر از گردابه ساعتگرد جدا شده از لبه بالایی قرار دارد که در این حالت گردابه از نوع رانش‌زا می‌باشد. در دمای ۴۰۰ درجه نیز گردابه ساعتگرد جدا شده از لبه بالایی، اندکی بالاتر از گردابه پادساعتگرد جدا شده از لبه پایینی می‌باشد، که طبق بحث‌های مطرح شده در مقدمه، این نوع آرایش برای گردابه‌ها از نوع پسازا می‌باشد. همان‌طور که ذکر شد به دلیل کوچکی ضرایب پسای متوسط این تفاوت‌ها اندک هستند ولی به هر حال قابل مشاهده می‌باشند.



شکل ۲۲ ضریب پسا در دماهای سطح مختلف بالواره ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰,۰۰۰، فرکانس کاهیده ۷/۸۶ و دامنه نوسان بی بعد ۰/۰۱۲۵

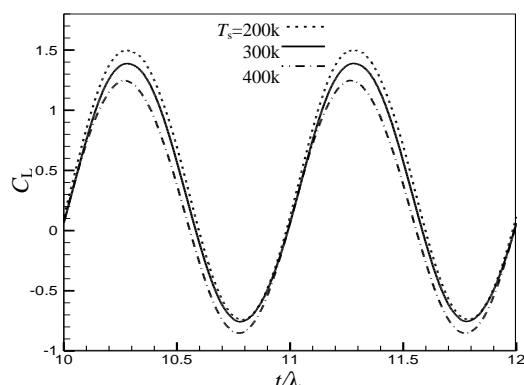


شکل ۲۳ مقادیر ضریب پسای متوسط در دماهای سطح مختلف بالواره ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰,۰۰۰، فرکانس کاهیده ۷/۸۶ و دامنه نوسان بی بعد ۰/۰۱۲۵

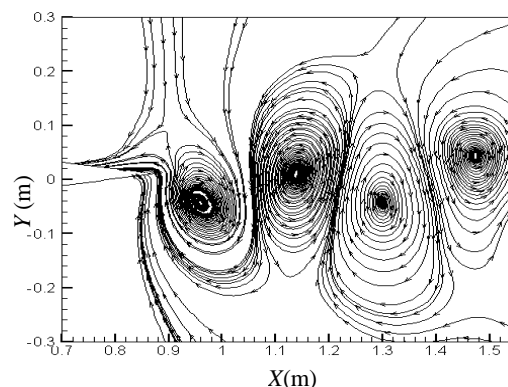


شکل ۲۴ ضریب برآ در دماهای سطح مختلف بالواره ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰,۰۰۰، فرکانس کاهیده ۷/۸۶ و دامنه نوسان بی بعد ۰/۰۱۲۵

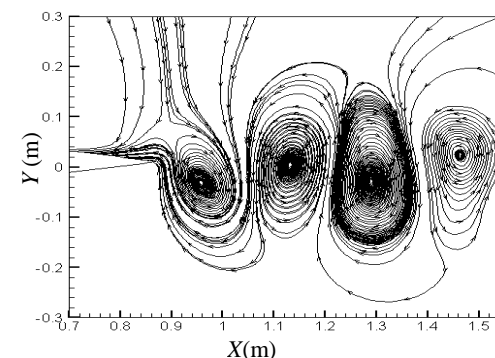
لحظه‌ای را در دو دوره متوالی (به‌علت نمایش هم‌گرایی این بالواره) نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود حالت سرمایشی اثر مثبتی بر عملکرد آیرودینامیکی بالواره داشته‌است به این معنی که ضریب برآی لحظه‌ای را افزایش و ضریب پسای لحظه‌ای را کاهش داده‌است، ولی گرمایش سطح بالواره با کاهش ضریب برآی لحظه‌ای و افزایش ضریب پسای لحظه‌ای، اثری منفی بر عملکرد بالواره داشته‌است. جدول (۲) این مطلب را به‌طور واضح نشان می‌دهد. به‌عبارتی با سرمایش سطح بالواره ضریب برآی متوسط افزایش قابل توجهی داشته و ضریب پسای متوسط نیز کاهش یافته‌است به‌گونه‌ای که نسبت ضریب برآی متوسط به ضریب پسای متوسط در حالت سرمایشی نسبت به حالت بدون انتقال حرارت ۸۷/۸ درصد افزایش یافته‌است، ولی گرمایش سطح برآی متوسط را کاهش و ضریب پسای متوسط را افزایش داده‌است به‌طوری‌که نسبت ضریب برآی متوسط به ضریب پسای متوسط نسبت به حالت بدون انتقال حرارت ۹۱ درصد کاهش یافته‌است. این نشان‌دهنده اثر مثبت سرمایش سطح بالواره و اثر منفی گرمایش سطح بالواره در عملکرد آیرودینامیکی بالواره انحنادار می‌باشد. نکته دیگر این‌که طبق گفته گوترو [5]، انحنای اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر ضریب برآی داشته ولی ضریب پسا را زیاد تغییر نداده‌است.



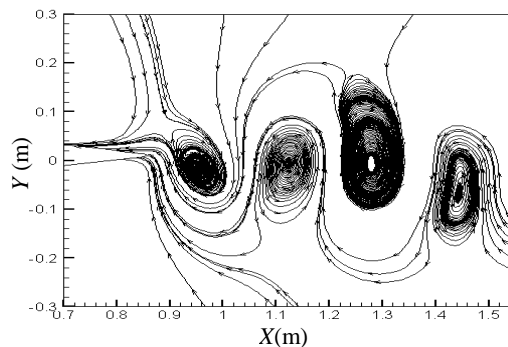
شکل ۲۸ ضریب برآی در دماهای سطح مختلف بالواره انحنادار ناکا ۴۴۱۲ در رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنه نوسان بی بعد ۰/۱۲۵



شکل ۲۵ گردابه‌های لبه انتهایی بالواره در  $t/\lambda=6.25$  و  $k=7.86$  دمای سطح بالواره برابر ۲۰۰ کلوین



شکل ۲۶ گردابه‌های لبه انتهایی بالواره در  $t/\lambda=6.25$  و  $k=7.86$  دمای سطح بالواره برابر ۳۰۰ کلوین



شکل ۲۷ گردابه‌های بر روی بالواره در  $t/\lambda=6.25$  و  $k=7.86$  دمای سطح بالواره برابر ۴۰۰ کلوین

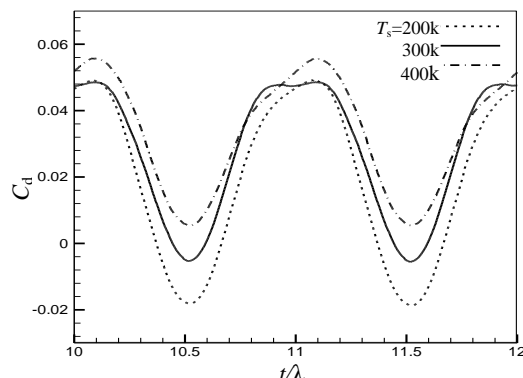
برای مطالعه اثر انتقال حرارت بر روی ضریب برآی بهتر است بالواره انحناداری در نظر گرفته شود و در حالت سرمایشی و گرمایشی قرار داده شود. برای این کار در تحقیق اخیر از بالواره ناکا ۴۴۱۲ استفاده شده‌است. شکل‌های (۲۸ و ۲۹) ضرایب برآی و پسای



درجه‌ای دمای سطح بالواره نسبت به دمای جریان آزاد، ضریب پسای متوسط ۱۰/۷ درصد و با افزایش ۱۰۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره، ضریب پسای متوسط تقریباً ۲۰/۲ درصد افزایش یافته‌است، این درحالی است که کاهش ۵۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره نسبت به دمای جریان آزاد، ضریب پسای متوسط را ۱۲/۹۸ درصد کاهش داده و کاهش ۱۰۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره ضریب پسای متوسط را ۳۸/۹۱ درصد کاهش داده‌است. روند افزایشی و کاهش‌ی ضریب پسای ناشی از انتقال حرارت در حالت نوسانی می‌تواند هم به‌خاطر افزایش و کاهش لزجت دینامیکی باشد و هم به‌الگوی گردابه‌ها در لبه انتهایی مربوط باشد. با کاهش دما لزجت دینامیکی کاهش می‌یابد که باعث کاهش پسای اصطکاکی می‌شود. همچنین کاهش دما فاصله عمودی بین گردابه‌های پشت بالواره را کاهش می‌دهد که این نیز از طریق کاهش پسای فشاری، پسای کل را کاهش داده‌است. عکس آن برای حالت گرمایشی صادق است. همچنین کاهش دمای سطح بالواره باعث اندکی اختلاف فاز در منحنی‌های ضریب برآ مخصوصاً در نقاط بیشینه و کمینه شده‌است.

۲- در فرکانس پایین ( $k=3.93$ )، الگوی گردابه‌ها در حالت‌های مختلف حرارتی از نوع پسازا می‌باشد و با افزایش فرکانس ( $k=7.86$ )، انتقال حرارت الگوی متفاوتی از گردابه‌ها را در پشت بالواره ایجاد کرده‌است، به‌گونه‌ای که در حالت بدون انتقال حرارت برای بالواره متقارن، گردابه‌ها تقریباً از نوع خنثی، در حالت سرمایشی بالواره، گردابه‌ها از نوع رانش‌زا و در حالت گرمایشی بالواره، گردابه‌ها از نوع پسازا بوده‌اند.

۳- درمورد بالواره انحنادار ناکا ۴۴۱۲، انتقال حرارت بر روی بالواره علاوه بر تأثیر بر ضرایب پسای لحظه‌ای و متوسط و ضرایب برآی لحظه‌ای، اثر قابل توجهی بر ضریب برآی متوسط گذاشته‌است به‌گونه‌ای که نسبت ضریب برآی متوسط به ضریب پسای متوسط در حالت



شکل ۲۹ ضریب پسا در دماهای سطح مختلف بالواره انحنادار ناکا ۴۴۱۲ در رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنه نوسان بی بعد ۰/۰۱۲۵

جدول ۲ مقادیر ضریب برآ و پسای متوسط و نسبت آنها در دماهای سطح مختلف بالواره ناکا ۴۴۱۲

$\overline{C_L}/\overline{C_d}$	$\overline{C_L}$	$\overline{C_d}$	
۲۲/۶۱	۰/۴۰۷	۰/۰۱۸	$T_s=200K$
۱۲/۰۳۷	۰/۳۲۵	۰/۰۲۷	$T_s=300K$
۶/۳	۰/۲۰۸	۰/۰۳۳	$T_s=400K$

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر انتقال حرارت بر روی عملکرد بالواره‌های نوسانی با حرکت فراز و فرود، توسط یک روش عددی بر مبنای حجم محدود بررسی شده‌است. جریان آرام با عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، لزج، قابل تراکم و ناپایا در نظر گرفته شده و با در نظر گرفتن تغییر مشخصات سیال با دما، مقدار لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی سیال به ترتیب با روابط ساترلند و اوکن ارزیابی شده‌است. نکات اصلی نتایج این تحقیق عبارتند از:

۱- درمورد بالواره متقارن ناکا ۰۰۱۲، دمای پایین‌تر بالواره نسبت به دمای جریان آزاد (حالت سرمایشی)، منجر به بهبود عملکرد بالواره شده‌است و دمای بالاتر سطح بالواره نسبت به دمای جریان آزاد (حالت گرمایشی)، اثر منفی بر عملکرد بالواره داشته‌است. به‌عنوان مثال برای بالواره ناکا ۰۰۱۲ با افزایش ۵۰

۴- در این تحقیق دمای پایین‌تر سطح بالواره نسبت به دمای جریان آزاد (حالت سرمایشی)، باعث بهبود عملکرد بالواره‌ها و دمای بالاتر سطح بالواره نسبت به دمای جریان آزاد (حالت گرمایشی)، اثری منفی در عملکرد آیرودینامیکی آنها داشته‌است.

سرمایشی درمقایسه با حالت بدون انتقال حرارت ۸۷/۸ درصد افزایش و نسبت ضریب برای متوسط به ضریب پسای متوسط در حالت گرمایشی نیز درمقایسه با حالت بدون انتقال حرارت، ۹۱ درصد کاهش یافته‌است.

## مراجع

1. Von Karman, T., Burgers J. and General, M., "Aerodynamic Theory, A General Review of Progress", edited by W.F. Durand, Vol. 2, Springer, Berlin, (1935).
2. Young, J., "Numerical Simulation of the Unsteady Aerodynamics of Flapping Airfoils", Ph.D Thesis, The University of New South Wales Australian Defence Force Academy, (2005).
3. Lai, J.C.S. and Platzer, M.F., "Jet Characteristics of a Plunging Airfoil", *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 12, pp. 1529-1537, (1999).
4. Jones, K.D., Dohring, C.M. and Platzer M.F., "Experimental and Computational Investigation of the Knoller-Betz Effect", *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 7, pp. 1240-1246, (1998).
5. Guerrero, J.E., "Effect of Cambering on the Aerodynamic Performance of Heaving Airfoils", *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 398-407, (2009).
6. Norton, D.J., Macha J.M. and Young J.C., "Surface Temperature Effect on Subsonic Stall", *Journal of Spacecraft and Rockets* 10, pp. 581-587, (1973).
7. Kim, J., Rusak, Z. and Koratkar, N., "Small-scale Airfoil Aerodynamic Efficiency Improvement by Surface Temperature and Heat Transfer", *AIAA Journal* 41, pp. 2105-2113, (2003).
8. Bekka N., Bessai R. and Sellam h, M., "Numerical Study of Heat Transfer around the Small Scale Airfoil Using Various Turbulence Models", *Numerical Heat Transfer Part A: Applications* 56, pp. 946-969, (2009).
9. Hinz, D.F., Alighanbarin, H. and Breitsamter, C., "Influence of Heat Transfer on the Aerodynamic Performance of a Plunging and Pitching NACA0012 Airfoil at Low Reynolds Numbers", *Journal of Fluids and Structures* 37, pp. 88-99, (2013).
10. Open CFD Limited, 2008a. Open FOAM—The Open Source CFD Toolbox User Guide, version 2.3.
11. Open CFD Limited, 2008b. Open FOAM—The Open Source CFD Toolbox Programmer's Guide, version 2.3.
12. Gnoffo, P. and Vectorized, A, "Finite-volume, Adaptive Grid Algorithm Applied to Planetary Entry Problems", *AIAA journal*, Vol. 21, No. 9 .pp. 1249-1254, (1983).
13. Nakahashi, K. and Deiwert, G.S., "Three-dimensional Adaptive Grid Method", *AIAA Journal*, Vol. 24, No. 6, pp. 948-954, (1986).
14. Baghri A., Djavarehshkian M. H., Esmaili A. and Zamanifard A.M., "Aerodynamic Investigation and Optimization of Airfoil Geometry and Oscillation Parameters in the Plunging Motion Using RSM", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No 16, pp. 101-111, (2012)
15. Zamanifard, A.M., "Plunging Motion simulation of an Oscilating Airfoils with Dynamic Mesh", MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, (2012).
16. Ferziger, J.H. and Peric M., "Computational Method for Fluid Dynamics", Springer London, (2002).

17. Versteeg, H.K., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite Volume Method", 2/E: Pearson, February 16, (2007).
18. Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., "Introduction to Heat Transfer", Fourth Edition, New York: Wiley, (2001).
19. Sutherland, W., "The Viscosity of Gases and Molecular Force", *Philosophical Magazine* 5, Vol. 13, pp. 507-531, (1893).
20. Eucken, A., "Allgemeine Gesetzmäßigkeiten für das Wärmeleitvermögen verschiedener Stoffarten und Aggregatzustände", Fourth Edition, New York: Wiley, (1940).