



MAE1-2016-000

## مقایسه روش شبکه گردابه ناپایا<sup>۱</sup> با روش های عددی در بررسی حرکت یک بالزن<sup>۲</sup>

سید محمد مهدی عقیلی<sup>۱</sup>، محمد حسن جوارشکیان<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، آیرودینامیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

\* مشهد ۱۱۱۱-۹۱۷۷۵، [javarehshkian@um.ac.ir](mailto:javarehshkian@um.ac.ir)

### خلاصه

در این تحقیق حرکات یک پرنده بالزن شامل فراز و فرود<sup>۳</sup> و پیچش در زوایای حمله، نسبت منظری و فرکانس های متفاوت که بصورت عددی تحلیل شده اند با روش شبکه گردابه ناپایا شبیه سازی و مورد مقایسه قرار گرفته است. در این روش پس از تعریف هندسه، جریان پتانسیل ناپایا حول آن را با استفاده از حلقه های گردابه<sup>۴</sup> حل می نماید. در این روش هر گام زمانی بصورت پایا حل می شود یعنی در هر گام زمانی سرعت القایی ناشی از بال و دنباله ی آن در تمام نقاط مرکز حلقه گردابه محاسبه شده و نیروهای آیرودینامیکی محاسبه می گردند. در نهایت مجموع آثار تمام گام ها بصورت حل ناپایا ارائه می شود. سادگی، هزینه کم و دقت بسیار مناسب این روش سبب می شود تا پیش از تحلیل عددی حرکت یک بالزن مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: شبکه گردابه ناپایا، بالزن، حلقه گردابه

### ۱. مقدمه

با توجه به رشد روزافزون ریز پهپادها علی الخصوص بالزن ها و کاربردهای مختلف آنها برای ساخت و بهره برداری، به شبیه سازی های آیرودینامیکی پیش از ساخت برای پیش بینی نیروها و گشتاورهای پروازی نیاز است. اغلب شبیه سازی های پیشین انجام شده برای بالزن ها بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی دو بعدی بوده است. این امر به دلیل بالابودن هزینه ی محاسباتی شبیه سازی سه بعدی می باشد. پرندهگان و حشرات و به طور کلی بالزن ها نیروهای آیرودینامیکی خود را از طریق حرکات بال خود تامین می نمایند. نوع حرکت بال برای پرنده های بالزن بسیار مهم است و تغییر در نوع حرکت بال زدن بر روی نیروها و گشتاورهای تولیدی اثر می گذارد و پرنده را برای انجام مانورهای مختلف آماده می گرداند. تلاش های زیادی برای دستیابی به یک مدل مناسب پیشرفته برای شبیه سازی آیرودینامیکی یک بالزن انجام شده است. نمونه ای از این تلاش ها توسط مینوتی [۱] در سال ۲۰۰۲ و بر اساس تئوری پتانسیل دوبعدی و در سال ۲۰۰۶

<sup>1</sup> Unsteady vortex lattice method

<sup>2</sup> Flapping

<sup>3</sup> Heaving

<sup>4</sup> Vortex rings



بوسیله‌ی انصاری و همکاران [۲] انجام پذیرفت. دسته‌ی دیگری از شبیه‌سازی‌ها بر مبنای تئوری المان تیغه توسط واکر و همکاران [۸] و سان و همکاران [۹] انجام پذیرفت که از لحاظ حجم شبیه سازی و هزینه‌ی محاسباتی در حد متوسطی قرار داشت.

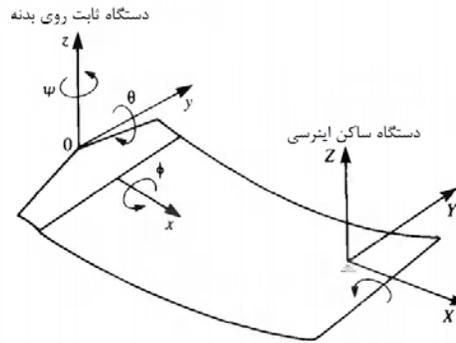
در مقابل مدل‌های تحلیلی، مدل‌های بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۵</sup> که اطلاعات دقیقی از نیروهای آیرودینامیکی و ساختمان دنباله‌های سیال در برگیرنده‌ی بال در اختیار قرار می‌دهند، استفاده می‌شوند. ولی از یک نظر تفکیک مکانیزم‌های دینامیکی سیال در تولید نیروها در این مدل‌ها دشوار است و از نظر دیگر این از لحاظ زمان شبیه‌سازی بسیار پر هزینه هستند و لذا برای فرآیندهای بهینه‌سازی، استفاده از آنها بسیار وقت گیر است. نمونه‌هایی از استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای بالزن‌ها توسط لیو و همکاران [۵]، رامامورتی و همکاران [۶] در شبیه‌سازی حشره‌ی میوه و سان و همکاران [۷] به صورت مطالعات جامعی در بال حشرات مختلف انجام شده است. با این وجود نوع دیگری از روش‌های شبیه‌سازی نیمه‌تجربی و یا کاملاً تئوری و ناپایا بر مبنای روش شبکه گردابه وجود دارند که به دلیل سادگی و پایین بودن هزینه‌ی محاسباتی، به طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها می‌توانند حجم پارامترهای مورد بررسی در شبیه‌سازی را بسیار کاهش دهند. مزیت دیگر این روش‌ها دستیابی به یک دید و درک کلی از نیروهای تولیدی توسط یک بالزن است. چراکه برای استفاده‌ی دقیق از این روش باید اثرات ناپایایی حوزه‌ی حل جریان مانند نیروی القایی گردابه‌های جدا شده بر بال، شناخته و وارد روند شبیه‌سازی شود. این امر نگرشی مناسب از پرواز بالزن را در اختیار قرار می‌دهد. روش شبکه گردابه ناپایا با ایجاد فرضیاتی که در ادامه توضیح داده خواهد شد از روش شبکه گردابه پایا بدست می‌آید. لانگ و همکاران [۳] برای مدل‌سازی حرکت فراز و فرود و پیچش، استنفورد و بران [۶] در تحلیل آیرودینامیک یک بال بالزن به منظور بهینه‌سازی در حرکت رو به جلو، سیمپسون و پالاسیوس [۱۲] برای محاسبه‌ی پسای القایی پرندگان بالزن و کیم و همکاران [۱۵] در بررسی نیروی برآ و پیشران تولید شده در حرکت پرندگان بالزن، بر مبنای این دسته از روش‌ها به بررسی نیروهای بالزن پرداختند.

## ۲. تئوری شبکه گردابه ناپایا

همان‌طور که گفته شد روش شبکه گردابه ناپایا با تغییر در روش شبکه گردابه پایا حاصل می‌شود. در سیال غیر چرخشی و تراکم‌ناپذیر، میدان سرعت می‌تواند با حل معادله‌ی پیوستگی به دست آید. گرچه معادله‌ی پیوستگی تراکم‌ناپذیر به طور مستقیم شامل ترم‌های وابسته به زمان نمی‌شود، و وابستگی به سرعت از طریق شرایط مرزی تعریف می‌شود. بنابراین، اولین موضوع این است که نشان دهیم، روش‌های حل جریان پایا می‌توانند با اصلاحات کمی مورد استفاده جریان ناپایا قرار گیرند. این اصلاحات شامل رفتار شرایط مرزی "صفر بودن سرعت عمود بر سطح جامد" و استفاده از معادله‌ی برنولی ناپایا می‌باشد. علاوه بر این، به عنوان یک نتیجه‌ی حرکت غیر یکنواخت، گردابه‌ها در این جریان پیچیده‌تر از جریان پایای متناظر است و این باید در نظر گرفته شود.

در حرکت‌های با رفتار وابسته به زمان اجسام، انتخاب دستگاه مختصات بسیار با اهمیت است. توصیف حرکت ناپایای سطح در زمانی که شرط مرزی "سرعت عمودی صفر" روی یک جسم با دستگاه مختصات ثابت  $(x, y, z)$ ، اعمال می‌شود، مفید است؛ برای مثال مانور بال به تصویر کشیده شده در شکل ۱ را ببینید. حرکت نقطه‌ی  $O$  از این دستگاه مختصات در  $(x, y, z)$  در یک فریم اینرسی  $(X, Y, Z)$  مشخص فرض شده است. برای ساده‌سازی، فرض می‌شود که در  $t=0$ ، فریم اینرسی  $(X, Y, Z)$  با فریم  $(x, y, z)$  هم مکان است. سپس در  $t > 0$ ، حرکت نسبی نقطه‌ی  $O$  از فریم ثابت بدنه با موقعیت  $\mathbf{R}_0(t)$  و چرخش لحظه‌ای  $\Theta(t)$  آن که  $(\psi, \theta, \phi)$  زوایای چرخش اولیه هستند، مشخص می‌شود:

<sup>5</sup> Computational fluid dynamic



شکل ۱- دستگاه مختصات اینرسی و بدنه

$$\begin{aligned} (X_0, Y_0, Z_0) &= R_0(t) & (1) \\ (\theta, \psi) &= \theta(t) & (2) \end{aligned}$$

برای مثال در مورد یک جریان با سرعت ثابت  $U_\infty$  در جهت مثبت  $x$  (در فریم مرجع بال در شکل ۱) رابطه‌ی  $R_0(t)$  به صورت زیر خواهد شد:

$$(X_0, Y_0, Z_0) = (-U_\infty t, 0, 0) \quad (3)$$

یعنی، بال در حال جابه‌جایی در جهت منفی  $X$  است.

سیال اطراف جسم، غیر لزج، غیر چرخشی و تراکم‌ناپذیر در تمام میدان جریان به جز مرزهای جامد جسم و گردابه‌های آن فرض می‌شود. بنابراین یک جریان پتانسیل  $\phi(X, Y, Z)$  می‌تواند در فریم اینرسی تعریف شود و در نتیجه معادله‌ی پیوستگی در این فریم خواهد شد:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (\text{in the } X, Y, Z \text{ coordinates}) \quad (4)$$

اولین شرط مرزی مورد نیاز، صفر بودن سرعت عمود گذرنده از مرزهای جامد جسم است:

$$(\nabla \phi + v) \cdot n = 0 \quad (\text{in the } X, Y, Z \text{ coordinates}) \quad (5)$$

در اینجا  $v$  - سرعت سطح و  $n = n(X, Y, Z, t)$  بردار عمود بر این سطح متحرک می‌باشد. (لازم به ذکر است که  $v$  با علامت منفی تعریف شده است بنابراین سرعت جریان غیر مغشوش در فریم مرجع جسم مثبت خواهد شد.) از آن جایی که معادله‌ی ۳ مستقیماً به زمان وابسته نیست، وابستگی به زمان از طریق این شرط مرزی تعریف می‌شود (برای مثال موقعیت و چرخش  $n$  می‌تواند با زمان تغییر کند).

شرط مرزی دوم لازم میدانند که آشفتگی جریان ناشی از حرکت جسم از میان سیال، در دوردست جسم، کاهش یابد:

$$\lim_{|R-R_0| \rightarrow \infty} \nabla \phi = 0 \quad (6)$$

در مورد جریان ناپایا استفاده از شرط کلویین معادله‌ی اضافه‌ای را تأمین می‌کند که می‌تواند برای تعیین قدرت در جهت جریان گردابه‌ی ریخته شده در دنباله استفاده شود. به طور کلی، شرط کلویین توضیح می‌دهد که در ناحیه‌ی جریان پتانسیل، مومنوم زاویه‌ای نمی‌تواند تغییر کند و بنابراین گردش  $\Gamma$  در اطراف یک منحنی جریان شامل بال و دنباله‌اش ثابت می‌ماند:

$$\frac{d\Gamma}{dt} = 0 \quad (\text{for any } \Gamma) \quad (7)$$



حل این مسئله، که به دلیل شرایط مرزی اش به زمان وابسته است (معادله ۴)، در دستگاه مختصات ثابت روی جسم ساده تر است. بنابراین، یک تبدیل بین دو دستگاه مختصات بر اساس اطلاعات مسیر پرواز معادلات ۱ و ۲ باید ایجاد شود، لذا داریم:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = f(x_0, y_0, z_0, \phi, \theta, \psi) \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

چنین تبدیلی باید شامل جابه جایی و چرخش دستگاه (x, y, z) باشد.

در هر زمانی، معادله پیوستگی مستقل از چرخش دستگاه مختصات است و جرم باید ثابت باقی بماند. بنابراین کمیت  $\nabla^2 \phi$  مستقل از دستگاه مختصات لحظه ای است و معادله پیوستگی در ترم های (X, Y, Z) بدون تغییر باقی می ماند.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (\text{in } x, y, z \text{ coordinates}) \quad (9)$$

بنابراین، شرط مرزی عمودی صفر وارد بر سطح جامد در فریم جسم خواهد شد:

$$(\nabla \phi + v) \cdot n = 0 \quad (\text{in } x, y, z \text{ coordinates}) \quad (10)$$

در اینجا n بردار عمود بر سطح جسم در ترم های مختصات جسم (x, y, z) می باشد.

مهم ترین نتیجه ی معادلات ۹ و ۱۰ اینست که برای جریان های تراکم ناپذیر، حل لحظه ای مستقل از مشتقات زمان است. یعنی، از آن جایی که سرعت صوت بی نهایت فرض می شود، تأثیر آنی شرط مرزی فوراً در تمام محیط سیال پخش می شود. بنابراین تکنیک حل پایا می تواند برای رفتار وابسته به زمان مسئله با جایگذاری شرط مرزی لحظه ای (معادله ۱۰) در هر لحظه استفاده شود. شکل دنباله، به هر حال به گذشت زمان از حرکت بستگی دارد و در نتیجه یک مدل مناسب گردابه دنباله باید ایجاد شود.

برای شرایط جریان برآ، مقدار گردش به شکل دنباله و موقعیت خط ریختن دنباله<sup>۶</sup> بستگی دارد و بنابراین یک مدل دنباله مناسب باید ایجاد شود. ساده ترین حل این مسئله، اعمال کردن شرط مرزی دو بعدی کوتاه در طول لبه های فرار بال های ایجاد کننده ی برآ می باشد.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (11)$$

اعتبار این فرضیات به این بستگی دارد که مؤلفه ی سرعت سینماتیکی عمود بر لبه فرار که باید بسیار کوچکتر از سرعت مشخصه برای معادله ۱۱ باشد، تأیید شود.

حل معادله ۹، پتانسیل جریان و مؤلفه های سرعت را می دهد. وقتی که میدان جریان مشخص باشد، فشار نهایی می تواند توسط معادله ی برنولی محاسبه شود. در فریم اینرسی، این معادله عبارت است از:

$$\frac{v_{\infty}^2 - v^2}{2} = \frac{(\nabla \phi)^2}{2} + \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (\text{in } X, Y, Z \text{ coordinates}) \quad (13)$$

مقدار سرعت  $\nabla \phi$  مستقل از فریم مرجع است بنابراین شکل اولین ترم این معادله بدون تغییر باقی می ماند. مشتق زمانی پتانسیل سرعت، هنوز تحت تأثیر فریم مرجع است؛ بنابراین اخلاف فشار  $p_{\infty} - p$  چنین شکلی خواهد داشت:

$$\frac{v_{\infty}^2 - v^2}{2} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] - (V_0 + \Omega \times r) \cdot \nabla \phi + \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (\text{in } x, y, z \text{ coordinates}) \quad (14)$$

معادله ی ضریب فشار به صورت زیر خواهد شد:

$$C_p = \frac{p - p_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2} = - \frac{(\nabla \phi)^2}{v_{\infty}^2} + \frac{2}{v_{\infty}^2} [V_0 + \Omega \times r] \cdot \nabla \phi - \frac{2}{v_{\infty}^2} \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \quad (15)$$

سهام یک المان با مساحت  $\Delta S_k$  در بارهای آیرودینامیکی  $\Delta F_k$  عبارتست از:

$$\Delta F_k = -C_{p_k} \left( \frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2 \right) \Delta S_k n_k \quad (16)$$

<sup>6</sup> Wake shedding

### ۳. روند کلی کد شبکه گردابه ناپایا

بر مبنای تئوری فوق کدی توسعه داده شده و تاثیر مدل‌های مختلف و پارامترهای ناپایایی نیز بررسی شده است. کار انجام گرفته بدین صورت است که ابتدا ورودی‌های هندسی، زوایای حرکتی و مشتقات آنها داده می‌شود. سپس شکل هندسی بال با توجه به نقاط گردابه و نقاط کنترلی<sup>۷</sup> ایجاد می‌شود و با توجه به تعداد المان‌های تعریف شده، تقسیم بندی بر روی بال انجام می‌پذیرد. برای هر گام زمانی، حلقه حل به محاسبه معادلات حرکت و سرعت‌ها، محاسبه ضریب تاثیر (مولفه ی عمود سرعت القایی - معادله ۱۷)، محاسبه بردار لحظه ای<sup>۸</sup> RHS ( بردار مقادیر سمت راست معادله ۱۸)، حل ماتریس حاصل از ضریب تاثیر و بردار RHS و قدرت گردابه (معادله ۱۹) و در نهایت مولفه های نیرو می پردازد. پس از اتمام حلقه با تغییر گام زمانی دوباره روند فوق تکرار می شود. در نهایت با انتگرال گیری روی المان‌های بال و روی زمان مقادیر نیروها و ممان‌ها بدست می آید. فلوجارت روند کلی کد در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$a_{ij} = (u, v, w)_{ij}, n \quad (17)$$

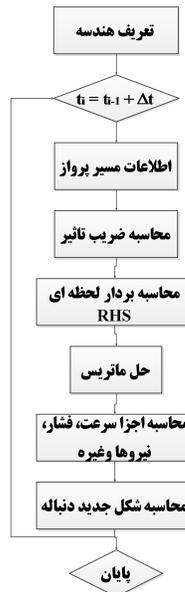
که در آن ضریب تاثیر ردیف  $i$  و ستون  $j$  شبکه بندی،  $u, v, w$  مولفه های سرعت القایی و  $n$  بردار عمود است.

$$\sum_{j=1}^{n+1} a_{ij} F_j = -[U(t) + w_{1W} V(t) + w_{1V} W(t) + w_{1U} F_W] \quad (18)$$

که در آن  $F_j$  قدرت گردابه  $j$  ام،  $U(t), V(t), W(t)$  مولفه های سرعت موضعی و  $w_{1U}, w_{1V}, w_{1W}$  مولفه های سرعت القایی دنباله می باشند.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} & a_{1W} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} & a_{2W} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} & a_{NW} \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & \dots & \mathbf{1} & \mathbf{1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_N \\ F_W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} RHS_1 \\ RHS_2 \\ \dots \\ RHS_N \\ F(t - \Delta t) \end{pmatrix} \quad (19)$$

که  $F_W$  قدرت گردابه دنباله می باشد.



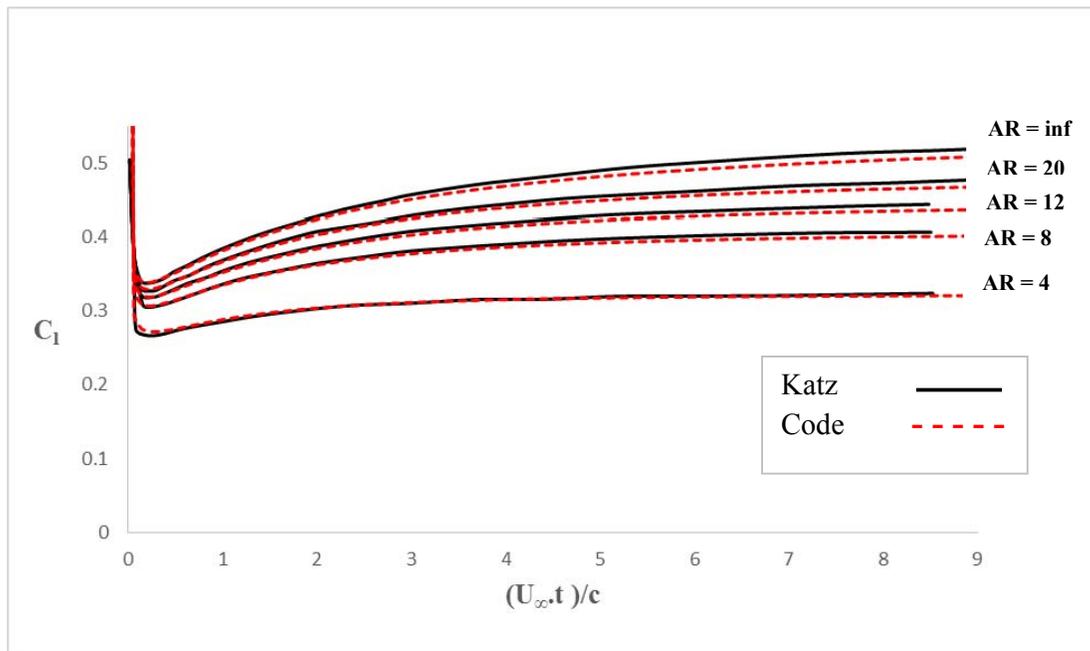
شکل ۲- فلوجارت روند کلی کد

<sup>7</sup> Collocation points

<sup>8</sup> Right Hand Side

#### ۴. اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی کد دو حرکت بالزن که توسط کاتز و همکاران [۱۴] انجام گرفته بود استفاده شد. حرکت اول مربوط به یک بال مستطیلی بدون خمیدگی<sup>۹</sup> با زاویه حمله ۵ درجه و گام زمانی برابر  $\frac{U_{\infty} \Delta t}{c} = 1/10$  که در پرواز رو به جلو با سرعت ثابت قرار گرفته است می باشد. بال به ۴ قسمت مساوی در راستای وتر<sup>۱۰</sup> و ۱۳ قسمت مساوی در راستای دهانه<sup>۱۱</sup> تقسیم می شود. نتایج بدست آمده برای تغییرات ضریب برآی گذرا نسبت به زمان برای نسبت منطری های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است.

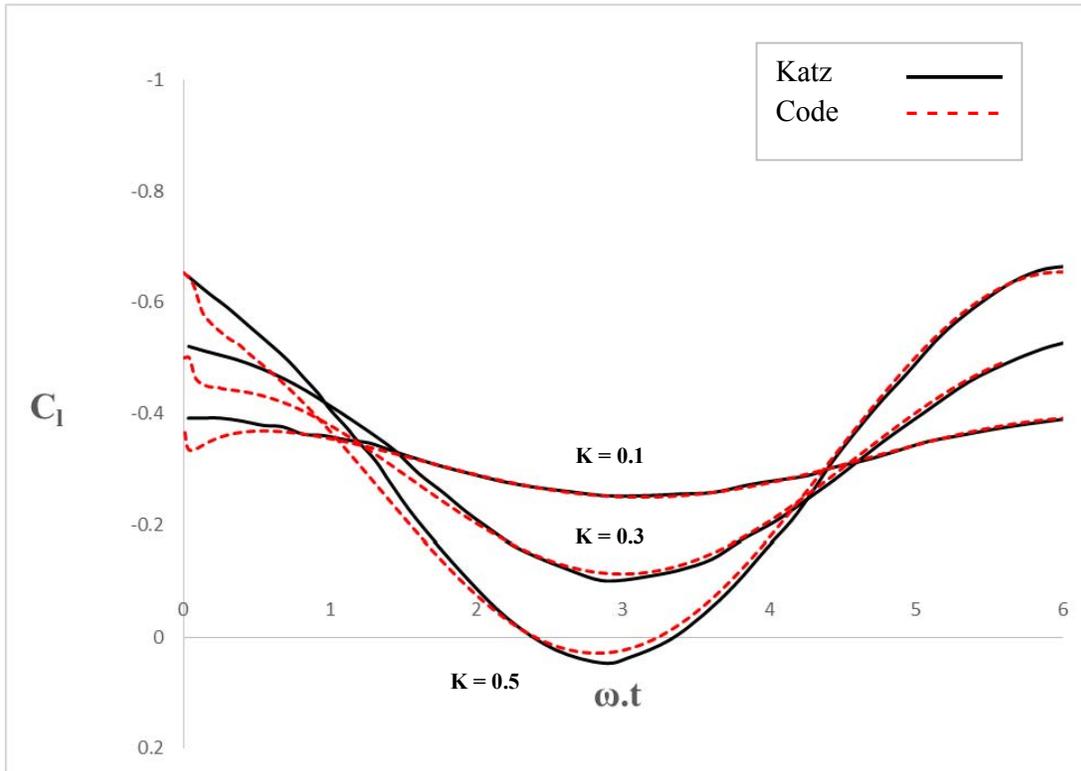


شکل ۳- تغییرات ضریب برآی گذرا با زمان برای بال مستطیلی با نسبت منطری های مختلف

حرکت دوم مربوط به بال مستطیلی بدون خمیدگی در حرکت فراز و فرود با زاویه حمله ۵- درجه، نسبت منطری  $AR = 4$ ، دامنه نوسان  $b_0 = 0.1c$  و فرکانس های کاهیده<sup>۱۲</sup>  $k = \frac{\omega^2}{U_{\infty}^2} = 0.1, 0.8, 0.2$  بدون در نظر گرفتن اثر سطح  $(h/v = w)$  می باشد. بال این بار نیز به ۴ قسمت مساوی در راستای وتر و ۱۳ قسمت مساوی در راستای دهانه تقسیم می شود. نتایج بدست آمده برای تغییرات ضریب برآی گذرا با زمان برای این بال با فرکانس های کاهیده مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.

کد شبکه گردابه ناپایا هر دو حرکت را به خوبی مدل سازی کرده و جواب ها کاملا منطبق است. لذا می توان وارد مرحله شبیه سازی مدل های اصلی شد.

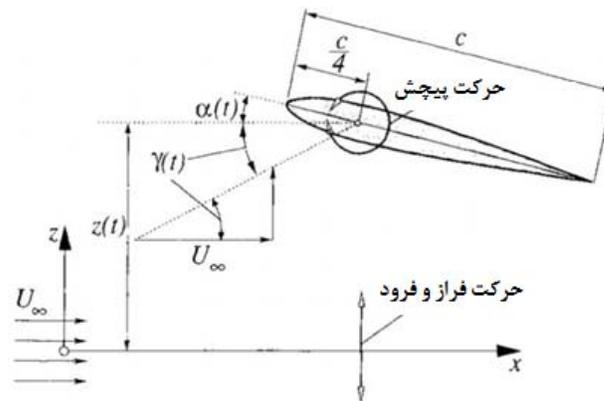
<sup>9</sup> Uncambered  
<sup>10</sup> Chordwise  
<sup>11</sup> Spanwise  
<sup>12</sup> Reduce Frequency



شکل ۴- تغییرات ضریب برآ با زمان برای بال مستطیلی با فرکانس های گاهیده مختلف

### ۵. مدل های بررسی شده

مدل سازی اول مربوط به کار انجام گرفته توسط آقایان نیف و هومل [۱۱] که براساس حل اویلری برای یک ایروفیل با سطح مقطع NACA0012 که دارای دو حرکت ترکیبی پیچش (رابطه ۲۰) و فراز و فرود (رابطه ۲۱) است می باشد. شکل ۵ نشان دهنده این حرکات است.



شکل ۵- ایرفویل دوبعدی در حرکت فراز و فرود و پیچش حول محور c/4

$$z(t) = z_1 \cos(2\pi ft)$$

(20)

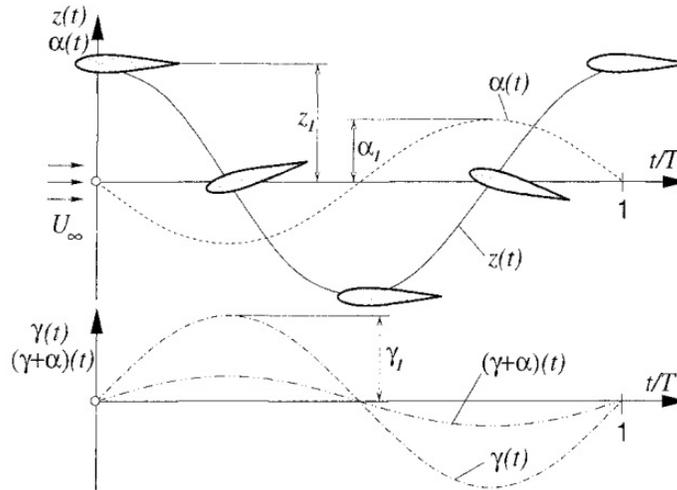
که در آن دامنه نوسان و  $f$  فرکانس حرکت است.

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \cos(2\pi ft + \phi) \quad (21)$$

که در آن  $\alpha_0$  زاویه حمله متوسط (زاویه پیش متوسط)،  $\alpha_1$  دامنه نوسان پیش و  $\phi$  اختلاف فاز نسبت به حرکت فراز و فرود می باشد.

با توجه به شکل ۶ زاویه حمله ناشی از تنها حرکت فراز و فرود برابر است با:

$$\gamma(t) = \tan^{-1} \frac{z'(t)}{U_\infty} \quad (22)$$

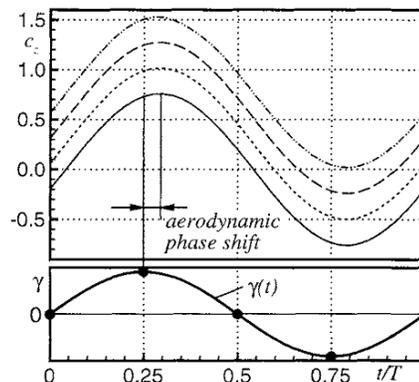


شکل ۶- اثر حرکت پیش بر روی زاویه حمله

اضافه شدن حرکت پیش می تواند سبب افزایش یا کاهش زاویه حمله موثر لحظه ای شود  $(\gamma + \alpha)$ ، که این به اختلاف فاز  $(\phi)$  بستگی دارد. حل این مدل در CFD با ساختار O-topology در دو شبکه بندی  $160 \times 32 = 5120$  و  $320 \times 64 = 20480$  انجام گرفته است. شکل ۷ نتایج حاصل از محاسبات اویلر دو بعدی برای دو حرکت ترکیبی فراز و فرود و پیش با اختلاف فاز  $\phi = 90^\circ$  را نشان می دهد. فرکانس کاهشده  $k = 1$ ، دامنه نوسان فراز و فرود و پیش به ترتیب برابر  $\alpha_1 = 4$  و  $b_1/b = 1.0$  می باشد. ضریب نیروی عمودی برابر است با:

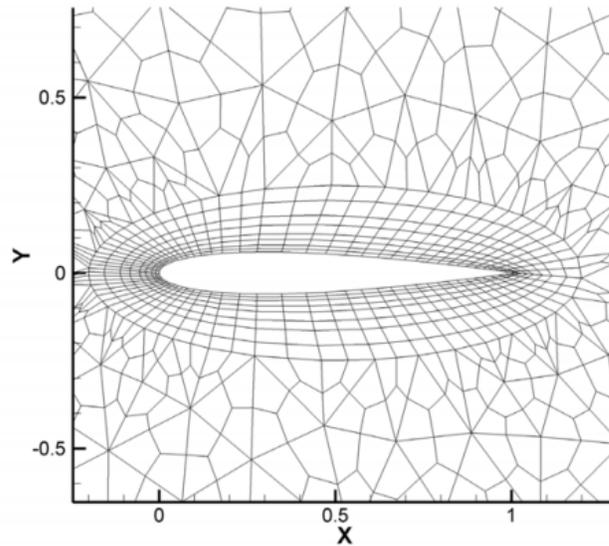
$$C_z = \frac{F_z}{\rho U_\infty^2 b_{ref} l_{ref}} \quad (23)$$

$b_{ref}$  عرض ایرفویل و  $l_{ref}$  طول کورد در نظر گرفته شده است لذا  $b_{ref} = l_{ref}$

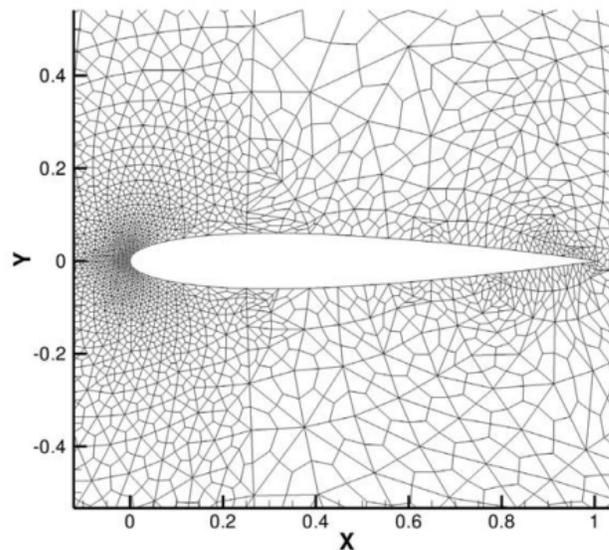


شکل ۷- ضریب نیروی عمودی برای زوایای حمله متوسط متفاوت در حرکت فراز و فرود و پیش

مدل سازی دوم مربوط به کار انجام گرفته توسط آقای لیانگ و همکاران [۱۱] که براساس حل اسپکترال مرتبه بالا<sup>۱۳</sup> برای یک ایروفیل با سطح مقطع NACA0012 در جریان با لزجت که دارای دو حرکت فراز و فرود آهسته و سریع است می باشد. شبکه بندی ایرفویل در CFD بصورت شکل ۸ با ۵۷۹۲ المان و شکل ۹ با ۱۶۴۳۸ المان می باشد.



شکل ۸- مش ۴ ضلعی پس از h-refinement



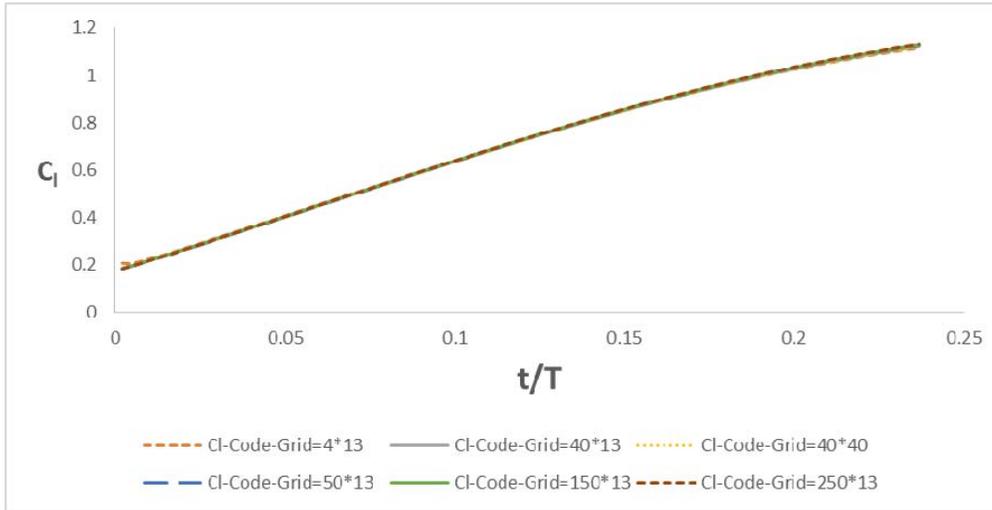
شکل ۹- مش بندی با دقت بالاتر

در حرکت فراز و فرود آهسته  $\omega = 1.18, h = 0.080, Sr = 0.44$  و در سریع  $\omega = 2.46, h = 0.120, Sr = 1.2$  می باشد.  $Sr$  عدد اشتروهل است.

<sup>13</sup> High-order spectral difference

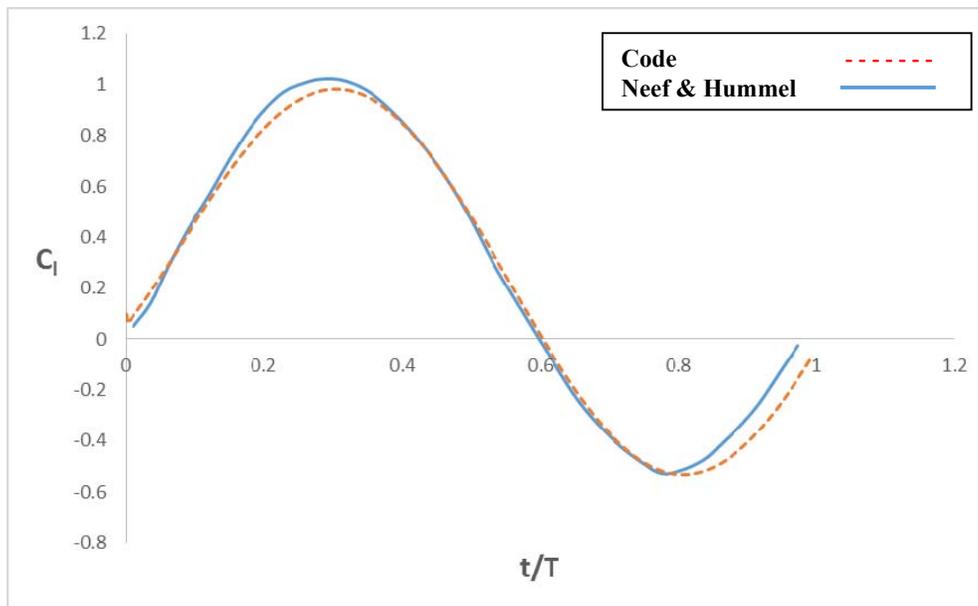
### ۶. نتایج و بررسی آن ها

در مدل اول به منظور بررسی استقلال از مش، چند شبکه بندی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان از استقلال از مش می دهد. شکل ۹ استقلال از مش برای شبکه بندی های مختلف در زاویه حمله متوسط  $4^\circ$  می باشد.



شکل ۱۰- بررسی استقلال از شبکه بندی در محاسبه ضریب برآ (برای زاویه حمله  $4^\circ$  درجه)

شکل های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نتایج بدست آمده برای تغییرات ضریب برآ با زمان زوایای حمله مختلف را نشان می دهند. هرچه زاویه حمله کمتر است نتایج دقت بیشتری دارند. اختلاف نتایج با افزایش زاویه حمله که سبب جدایش جریان و تاثیر لزجت می شود و در کد با توجه به مفهومی حل جریان پتانسیل قادر به تحلیل نمی باشد بیشتر می گردد.



شکل ۱۱- تغییرات ضریب برآ با زمان در زاویه حمله  $2^\circ$  درجه

$$\frac{\partial \vec{r}}{\partial \psi_w} + \frac{\partial \vec{r}}{\partial \psi_b} = \frac{1}{\Omega} \vec{V}(\vec{r}, t) \quad (1)$$

که در آن  $\psi_w$  و  $\psi_b$  متغیرهای ... برای ذره‌ای با سرعت  $\vec{V}$  در موقعیت  $\vec{r}$  و زمان  $t$  هستند.

۱۱. **قدردانی (B Nazanin 12 pt, Bold) (فونت: B Nazanin, اندازه فونت ۱۲ و ضخیم)**

در صورت لزوم، بخش کوتاه تقدیر و تشکر می‌تواند قبل از ارائه فهرست مراجع ذکر گردد.

۱۲. **مراجع (B Nazanin 12 pt, Bold) (فونت: B Nazanin, اندازه فونت ۱۲ و ضخیم)**

فهرست مراجع بعنوان آخرین بخش مقاله با فونت (Times New Roman 12pt) نوشته می‌شوند. ترتیب آنها مطابق با ترتیب طرح آنها در داخل متن می‌باشد و فقط شامل مواردی است که مستقیماً در متن مقاله به آنها ارجاع شده است. همچنین بایستی از علامت [ ] دقیقاً در همان محل استفاده از مرجع برای شماره گذاری استفاده نمود. در تعریف هر مرجع اطلاعات کامل مطابق با استانداردهای موجود ذکر گردد. برای مراجع فارسی، از فونت (B Nazanin 12pt) استفاده گردد. موارد زیر نحوه ارائه این اطلاعات را نشان می‌دهند:

1. Areias, P.M.A. and Belytschko, T. (2005), "Analysis of Three-Dimensional Crack Initiation and Propagation Using the Extended Finite Element Method," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **63** (55), pp 760–788.
2. Atluri, S.N. and Shen, S. (2002), "*The Meshless Local Petrov–Galerkin (MLPG) Method*", Tech Science Press, USA.
3. Udawadia, F. E. and Trifunac, M. D. (1973), "Ambient Vibration Test of Full Scale Structures," *Proc. of the 5<sup>th</sup> World Conf. On Earthquake Engineering*, Rome, pp
۴. فیوض، ع. (۱۳۶۹)، "مطالعه خصوصیات دینامیکی کندوهای بتنی با روش ارتعاشات محیطی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، شیراز.
5. Trifunac, M. D. (1970), "*Wind and Microtremor Induced Vibration of a 22 Story Steel Frame Building*," Earthquake Engineering Research Lab., Report EERL 70-01, California Institute of Technology, Pasadena California.
6. Sethian, J.A. (2006), "*Moving interfaces and boundaries: level set methods and fast marching methods*," [http://math.berkeley.edu/~sethian/Explanations/level\\_set\\_explain.html](http://math.berkeley.edu/~sethian/Explanations/level_set_explain.html).
۷. علی حوری، م. ح. و شریفی، م. ب. (۱۳۷۹)، "پیش بینی تقاضای آب با شبکه های عصبی مصنوعی"، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، جلد چهارم، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران، ۲۱-۱۹ اردیبهشت، ۲۰۳-۱۹۵.