



## مطالعه عددی نوسانات پایدارکننده انعطاف پذیر متصل به جسم در حال ارتعاشات اجباری با استفاده از شبیه‌سازی اندرکنش سیال-سازه

ابوالفضل کیانی<sup>۱</sup> و میثم محمدی امین<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار مهندسی مکانیک- هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۶، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۲/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۰۵

### چکیده

در این مقاله به مطالعه نوسانات یک پایدارکننده انعطاف‌پذیر متصل به جسم سه‌بعدی پرداخته شده است که در حال ارتعاشات اجباری در جریان سیال لزج فروصوت قرار دارد. هدف از پژوهش حاضر، اولاً تحلیل تداخل سازه و سیال با استفاده از الگوریتم ترکیبی مناسبی است که بتواند بخش حل سیال و حل سازه را بخوبی با هم ترکیب نموده و تبادل اطلاعات بین آنها را تامین نماید، ثانیاً تحلیل پایداری جسم در حضور صفحه انعطاف‌پذیر متصل به انتهای آن است. برای این منظور، از الگوریتم چند بخشی تکراری برای تبادل اطلاعات میان بخش‌های سیال و سازه استفاده شده است. در ادامه با توجه به سختی خمشی‌ها و جرم‌های متفاوت نوار باریک، نتایج مربوط به مشخصات نوسان شامل دامنه و فرکانس، همچنین تغییرات نیرو و گشتاور ناشی از نوسانات ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که چارچوب محاسباتی توسعه یافته با خطای کمتر از ۱۰ درصد برای شاخص‌های مورد نظر، فیزیک حاکم بر مسأله تداخل سیال - سازه را تسخیر نموده است؛ همچنین مطالعه ارتعاشات اجباری جسم به منظور آنالیز پایداری آن با توجه به ضریب میرایی پیچشی، انجام گرفت که نتایج حاصل نشان می‌دهد، با توجه به شاخص پایداری، وجود صفحه انعطاف‌پذیر می‌تواند وضعیت پایداری جسم را تا حد زیادی بهبود بخشد.

**کلمات کلیدی:** اندرکنش سیال-سازه؛ آنالیز پایداری؛ شبیه‌سازی عددی؛ مدل تیر؛ الگوریتم ترکیبی.

## Numerical Investigation of Oscillations of Flexible Stabilizer Attached to Forced Vibrated Body via Fluid-Structure Interaction Simulation

A. Kiani<sup>1</sup>, M. Mohammadi-Amin<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> PhD candidate, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran

### Abstract

In this paper, oscillations of a flexible stabilizer attached to three dimensional body in viscous subsonic flow are investigated. The purpose is firstly to analyze fluid structure interactions using a proper coupling algorithm that can couple the fluid and structure solvers and provide the data exchange between them and secondly to perform the stability analysis of body with its flexible stabilizer. For this purpose, iterative partitioned coupling algorithm is used for data exchange between structure and fluid. Then, the results of vibration characteristics including the amplitude and frequency and forces and moments variations are presented with respect to different bending stiffness and strip masses. Results show that the developed framework captures the physics of fluid-structure interaction with errors less than 10%. Finally, body stability analysis is performed with respect to the pitch damping coefficient using body forced vibrations and the obtained results showed the capability of strip stabilizer for providing the desired body stability.

**Keywords:** Fluid-Structure Interaction; Stability Analysis; Numerical Simulation; Beam Theory; Coupling Algorithm.

## ۱- مقدمه

پایداری پرتابه‌ها به ویژه در فاز نزول از موضوعاتی است که تاکنون مورد توجه بسیاری از محققان و مهندسان بوده است. یکی از روش‌های متداول برای تحقق این امر، استفاده از پایدارکننده‌های انعطاف‌پذیر مانند، ریبون‌ها در شکل‌ها و چیدمان‌های گوناگون است. بدیهی است که طراحی بهینه این نوع پایدارکننده‌ها براساس تحلیل‌های چندوجهی شامل، بررسی تداخل سازه-سیال، شبیه‌سازی دینامیکی و پایداری پرتابه و مطالعات پارامتری متنوع روی پیکره‌بندی، جنس سازه و نحوه اتصال پایدارکننده، صورت می‌پذیرد. با توجه به ماهیت پیچیده و چند فیزیکی بودن مسأله، نیاز به ابزارهای تحلیلی مختلف برای انجام مطالعات فوق است. بطور خلاصه به یک چارچوب محاسباتی نیاز است که ابزارهای تحلیلی را بطور کارآمد با یکدیگر مرتبط ساخته و در کنار هم بطور بهینه بکارگیرد. هدف این مقاله نیز، اولاً توسعه یک چارچوب محاسباتی با ویژگی‌های مذکور بوده و سپس آنالیز پایداری جسم با استفاده از بررسی ارتعاشات اجباری آن است.

ملزیگ و سالاریس (۱۹۶۸) تحقیق آزمایشگاهی جهت تعیین توزیع فشار روی سطح چتر هنگام باز شدن انجام دادند [۱]. پیترسون و استریکلند (۱۹۹۶) نیز روی دینامیک باز شدن چتر تحقیقاتی انجام داده‌اند [۲]. لوین و داسر (۱۹۹۷)، یک مطالعه تجربی روی مشخصه‌های درگ ریبون‌ها در تونل باد مادون صوت انجام دادند [۳]. این مطالعه براساس تغییر ضریب منظری و جنس ماده ریبون‌های مستطیلی انجام شده است. آومان و دالکه (۲۰۰۰)، تست آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات ایرودینامیکی پایدارکننده ریبونی یک نارنجک ارائه داده است [۴]. کاسادی و هالوکس (۲۰۰۱)، به بررسی الگوریتم‌های اندرکنش سیال-سازه گذرا در کاربردهای مقیاس بزرگ صنعتی پرداختند [۵]. آومان و ویلکس (۲۰۰۵)، تست تجربی جهت تعیین مشخصه‌های ایرودینامیکی پایدارکننده‌های ریبونی انجام دادند [۶]. این نتایج از تست تونل باد افقی حاصل شده است و نشان داده شده است که چگونه می‌توان از ریبون کاهنده سرعت جهت پایدار کردن هندسه‌های استوانه‌ای استفاده کرد.

بیشتر تحقیقات اخیر و گذشته روی تعیین تجربی مرز ناپایداری متمرکز شده‌اند و تعداد کمی از تحقیقات روی تحلیل عددی دینامیک بال زنی و مکانیزم آن متمرکز

بوده‌اند. کومار و وانگ و لیتون (۲۰۱۰)، در تحقیقی که در مورد مسأله تداخل سیال-سازه انجام داده‌اند، مشخص کردند که این مسأله به دلیل طبیعت غیرخطی قوی و چند وضعیتی آن، هنوز بصورت یک چالش مطرح است [۷]. بالد و اتین (۲۰۱۱) با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ، ناپایداری تداخل سازه و سیال را در مورد پرچم بررسی کرده‌اند [۸]. در این مورد ناپایداری از نوع کلوبین-هلمهولتز است. کشش ایجاد شده روی پرچم ناشی از نیروی اصطکاک سیال، مایل است پرچم را پایدار کند که در این حالت باید سختی خمشی پرچم کم و اینرسی آن محدود باشد.

عبدالرحمن و پایدوسیسی (۲۰۱۱)، دینامیک رژیم بال زنی یک رشته که در نوار صابون دو بعدی واقع شده، برای طول‌های مختلف رشته و سرعت‌های متفاوت جریان را بررسی کرده‌اند [۹]. لامار و واین (۲۰۱۱)، برای تعیین مشخصه‌های ایرودینامیکی ریبون‌های پایدارکننده نارنجک از روش‌های تجربی استفاده کرده‌اند [۱۰]. این داده‌ها از آزمایشات تست تونل باد افقی و عمودی، تست‌های سقوط آزاد و تست پروازی حاصل شده است. از بررسی نتایج مشخص شد که اصطکاک پوسته فقط بخش کوچکی از درگ ریبون است و بخش اصلی و عمده درگ در اثر فلاتر (بال زنی) پارچه است. اودووا (۲۰۱۲)، روی روش‌های کوپل و ترکیب معادلات حاکم بر تداخل سیال-سازه و فرمولاسیون المان محدود آن تحقیقاتی انجام دادند [۱۱].

یو و وانگ (۲۰۱۲) به شبیه‌سازی عددی نوسانات یک صفحه انعطاف‌پذیر سه بعدی پرداخته‌اند که در معرض یک جریان پایا قرار گرفته است [۱۲]. ریول و فاویر (۲۰۱۳)، یک روش عددی برپایه شبکه بولتزمن و روش مرز شناور برای حل مسأله تداخل حرکت اجسام نازک انعطاف‌پذیر در یک جریان سیال تراکم‌ناپذیر ارائه کرده‌اند [۱۳]. ویروت و آماندولس (۲۰۱۳)، به بررسی نیروهای وارد بر پرچم در حال نوسان پرداخته‌اند [۱۴].

## ۱-۱- الگوریتم حل اندرکنش سیال-سازه

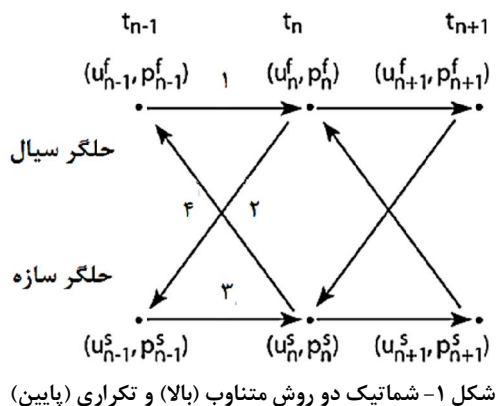
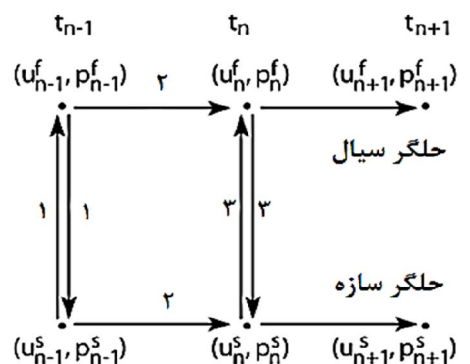
جهت تحلیل مسائل تداخل سازه و سیال باید الگوریتمی موجود باشد تا بتواند یا معادلات سازه و سیال را بطور همزمان حل کرده (روش یکپارچه) و یا اینکه ارتباط منطقی بین نتایج حل سیال و سازه برقرار کند (روش چندبخشی)،

بخش سیال می‌شود و سیال مجدداً بر اساس داده‌های جدید سازه حل شده و این چرخه تکراری تا حل کامل مسأله و ارضای شرایط توقف محاسبات ادامه می‌یابد.

در این پژوهش از روش چند بخشی به صورت تکراری استفاده خواهد شد. حال اگر از منظر نوع الگوریتم ترکیب بنگریم، می‌توانیم بگوییم که دو نوع الگوریتم ترکیبی وجود دارد که شامل، الگوریتم ترکیبی ضعیف و الگوریتم ترکیبی قوی یا دقیق است. در الگوریتم ترکیبی ضعیف، در هر گام زمانی تنها یک حل از سازه و سیال خواهیم داشت؛ لذا باید گام زمانی بسیار حساب شده و از روی تجربه انتخاب گردد و گرنه باعث ناپایداری حل خواهد گردید؛ اما در الگوریتم ترکیبی قوی در هر گام زمانی، چندین حل سیال و سازه داریم تا این دو کاملاً همگام شده و سیستم ایروالاستیک همگرا گردد؛ لذا باعث طولانی‌تر شدن حل می‌شود، ولی از روش قبلی بسیار پایدارتر است. در ضمن از لحاظ الگوریتمی، برای سیستم‌های مختلف فیزیکی انعطاف پذیر بوده و قابل کاربرد است.

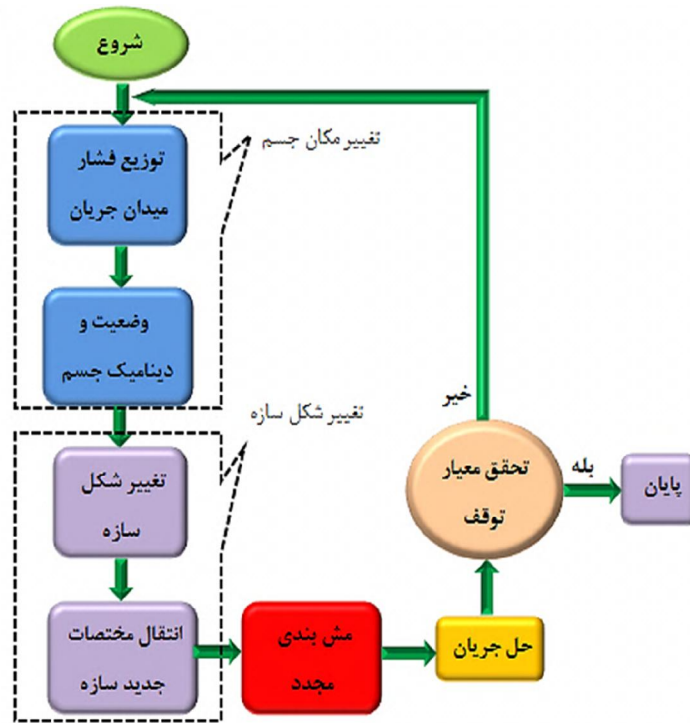
فلوچارت الگوریتم ترکیبی تحلیل مسأله تداخل سیال-سازه مورد استفاده در مقاله حاضر نیز، در شکل ۲ نشان داده شده است. مراحل کار به این صورت است که ابتدا با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی و تولید شبکه، هندسه مورد نظر را ایجاد نموده و سپس میدان اطراف آن به صورت کروی و با حداقل شعاع لازم که هم مناسب برای حل سیال بوده و هم تعداد شبکه آن زیاد نگردد، ایجاد شده و سپس شبکه‌بندی لازم صورت می‌پذیرد. چون در هر لحظه سلول‌های شبکه تغییر هندسه داده و زوایای سلول‌ها عوض شده و درهم رفتگی پیدا می‌کنند؛ لذا استفاده از شبکه بی‌سازمان بهتر و مناسب‌تر است. با حل معادلات جریان توسط یک نرم افزار تجاری مانند فلوئنت، توزیع فشار اطراف جسم مشخص شده و نیروها و گشتاورهای وارد بر آن تعیین می‌شود. اکنون با استفاده از معادلات سازه تغییر شکل سازه محاسبه گردیده و سپس نقاط جدید محاسبه شده بروزسانی می‌شود. حال با توجه به مختصات جدید سازه، شبکه‌بندی مجدد انجام شده و براساس مختصات شبکه بندی جدید، جریان سیال حل می‌شود. در مرحله بعد همگرایی حل بررسی شده و در صورت تایید یک گام زمانی به جلو می‌رویم. این فرایند تا رسیدن به معیار توقف ادامه می‌یابد (شکل ۲).

همچنین بتواند شبکه‌بندی سیال و سازه را با هم تطبیق دهد در صورتی که یکسان و واحد نباشد. در واقع روش اول بسیار زمانبر و پرهزینه بوده و مقرون به صرفه نمی‌باشد. در روش دوم، معادلات سازه و سیال با کدهای جدا که می‌تواند حتی غیر قابل تغییر باشد ( جعبه سیاه)، حل شده و توسط یک الگوریتم ترکیبی نتایج آنها با یکدیگر مبادله گردد. این روش هم ماژولاریتی و هم قابلیت انعطاف‌پذیری بالا دارد. روش چند بخشی، به دو صورت قابل اعمال است که در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۵].



شکل ۱- شماتیک دو روش متناوب (بالا) و تکراری (پایین)

در روش اول که روش متناوب نامیده می‌شود، در هر گام زمانی ابتدا داده‌های سیال و سازه با یکدیگر مبادله شده و سپس هر دو همزمان، ولی به طور مستقل حل می‌گردند. در روش دوم که روش تکراری نامیده می‌شود، ابتدا سیال حل گردیده و سپس داده‌های آن وارد بخش سازه شده و سازه بر اساس اطلاعات جدید سیال حل شده و داده آن وارد



شکل ۲- الگوریتم ترکیبی حل مساله تداخل سیال-سازه

### ۲-۲- معادلات سازه

معادله حرکت ارتعاش عرضی تیر اوپلر- برنولی با توجه به توزیع نیروی گسترده بصورت رابطه (۴) نوشته می‌شود:

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} [A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t + \frac{1}{\omega_i} \int_0^t Q_i(\tau) \sin \omega_i (t - \tau) d\tau] W_i(x) \quad (4)$$

دو عبارت اول بیانگر ارتعاشات آزاد و ترم سوم، بیانگر ارتعاشات اجباری تیر است. اعداد ثابت  $A_i$  و  $B_i$  نیز، با استفاده از شرایط اولیه بدست می‌آیند.

### ۳-۲- تحلیل پایداری جسم

در این بخش به ارائه روش تحلیل پایداری جسم پرداخته می‌شود. بدین منظور نیاز به تحلیل و بررسی ضریب میرایی پیچ  $(C_{mq} + C_{m\dot{\alpha}})$  است که در ابتدا معرفی این ضریب، روابط مربوطه و روش محاسبه آن بر اساس نوسان جسم، توضیح داده می‌شود. به منظور شبیه‌سازی پرواز اجسام پرنده و به‌خصوص پرتابه‌ها، محاسبه ضرایب دینامیکی بسیار حائز

### ۲- معادلات حاکم

در این بخش معادلات حاکم بر هر بخش از محاسبات و تئوری‌های مربوطه ارائه خواهد شد.

### ۲-۱- معادلات جریان سیال

معادلات حاکم بر این بخش، معادلات ناویر-استوکس است که به صورت زیر نوشته می‌شود:

- قانون بقاء جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{x} \frac{\partial x \rho U}{\partial x} + \frac{\partial \rho V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

- قانون بقاء اندازه حرکت:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \frac{1}{x} \frac{\partial x \rho U^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho V U}{\partial y} \\ = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{x} \frac{\partial x \pi_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \pi_{xy}}{\partial y} - \frac{\pi_{\theta}}{x} \end{aligned} \quad (2)$$

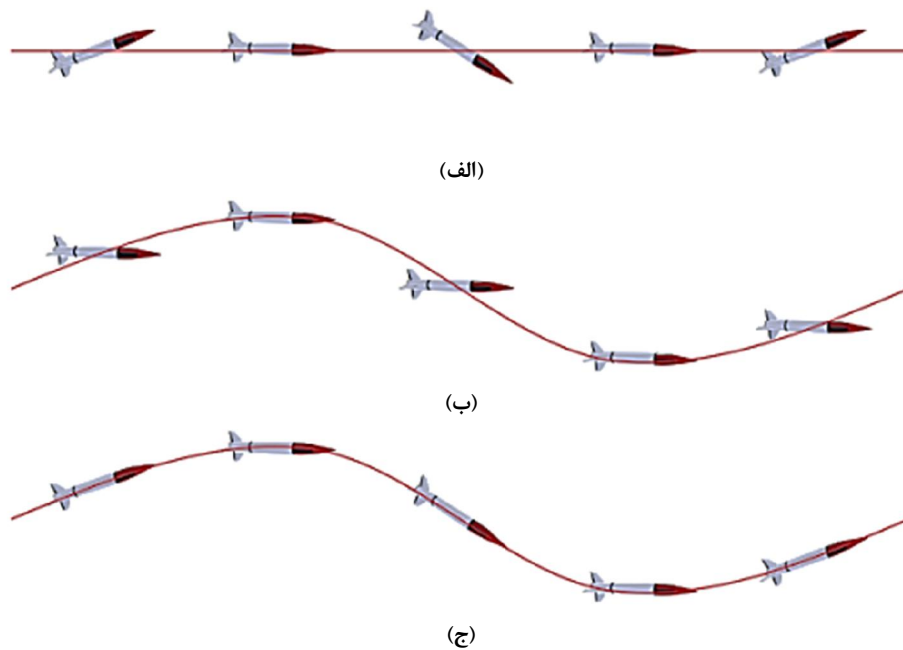
$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V}{\partial t} + \frac{1}{x} \frac{\partial x \rho U V}{\partial x} + \frac{\partial \rho V^2}{\partial y} \\ = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{x} \frac{\partial x \pi_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \pi_{yy}}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

شکل ۳ سه نوع نوسان هارمونیک اجباری (پیچشی، انتقالی و ترکیبی) را نشان می‌دهد.

الف - حرکت نوسانی پیچشی اجباری: این نوسان، جهت محاسبه ضریب میرایی پیچ ( $C_{mq} + C_{m\dot{\alpha}}$ ) بکار می‌رود.

ب - حرکت نوسانی انتقالی اجباری: برای محاسبه مشتق شتابی گشتاور پیچ ( $C_{m\dot{\alpha}}$ ) از این نوسان استفاده می‌شود.

ج - حرکت نوسانی ترکیبی اجباری: برای محاسبه مشتق چرخشی گشتاور پیچ ( $C_{mq}$ ) از این حرکت استفاده می‌شود.



شکل ۳- الف) حرکت نوسانی پیچشی، ب) حرکت نوسانی انتقالی و ج) حرکت نوسانی ترکیبی [۱۶]

$$C_{mq} + C_{m\dot{\alpha}} = \frac{(C_m^+ - C_m^-)}{\frac{qd}{2V_\infty}} \quad (۶)$$

که در رابطه بالا،  $C_m^+$  ضریب گشتاور پیچ در چرخش به سمت پایین در لحظه عبور از زاویه حمله اولیه و  $C_m^-$  ضریب گشتاور پیچ در چرخش به سمت بالا در لحظه عبور از زاویه حمله اولیه است که در شکل ۴ بصورت شماتیک مشخص شده است.

حال برای محاسبه ضریب میرایی پیچ با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، از یک نوسان اجباری استفاده

اهمیت است که در بین این ضرایب، ضریب میرایی پیچ جهت تعیین پایداری جسم در کانال طولی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله محاسبه این ضریب با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است. برای محاسبه این ضریب لازم است که حرکت نوسانی اجباری جسم شبیه‌سازی شود و برای این منظور، از مش متحرک باید استفاده شود. در ادامه در شکل زیر مفهوم این ضریب به تفکیک بیان شده است [۱۶].

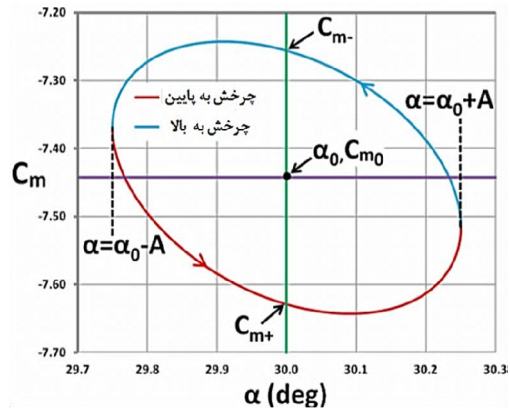
از ترکیب و برهم نهی نوسان انتقالی و بالزنی، حرکت نوسانی پیچ (طولی) حاصل می‌شود که رابطه آن بصورت (۵) است [۱۷] و [۱۸]:

$$C_{mq} + C_{m\dot{\alpha}} = \frac{(C_m - C_{m\alpha}\alpha)}{\frac{qd}{2V_\infty}} \quad (۵)$$

و  $C_m$  ضریب گشتاور پیچ،  $C_{m\alpha}$  شیب تغییرات گشتاور پیچ نسبت به زاویه حمله،  $\alpha$  زاویه حمله،  $q$  سرعت زاویه‌ای جسم،  $d$  قطر جسم و  $V_\infty$  سرعت جریان سیال است. با توجه به شکل ۴، رابطه ۵ را می‌توان به صورت (۶) نوشت:

در معرض جریان سیال پشت آن قرار دارد را مورد تحلیل قرار می‌دهیم. در شکل ۵ ابعاد هندسه مورد نظر و میدان اطراف آن مشخص شده است. مشخصات فیزیکی این صفحه در مرجع [۱۹] آمده است. سرعت جریان ۰/۵ متر بر ثانیه است. شرط مرزی میدان دور فشاری (Pressure-far-field)، در اطراف جسم فرض شده است. برای تسخیر اغتشاش، مدل اغتشاشی کا-ا پسیلون استاندارد در نظر گرفته شده است. روش کوپلینگ بر اساس فشار-سرعت بر پایه طرح سیمپل (Simple) بوده است و روش گسسته‌سازی مکانی بر اساس رویکرد حداقل مربعات گره مینا (Least squares nodebased) است. پس از انجام اجراهای گوناگون و بررسی گام‌های زمانی مختلف با توجه به معیار همگرایی، اندازه گام زمانی ۰/۰۰۲ ثانیه در نظر گرفته شده است و تعداد زیر تکرارها در هر گام زمانی ۲۰۰ تکرار لحاظ گردید تا همگرایی لازم در هر گام زمانی بدست آید. برای انجام مش متحرک نیز، از روش‌های هموارسازی و مش بندی مجدد استفاده شده است.

برای مطالعه شبکه، پس از بررسی شبکه‌بندی‌های مختلف با تعداد سلول‌های ۶۳۰۰، ۸۶۰۰، ۱۱۲۰۰، ۱۴۰۰۰، ۱۶۵۰۰ و ۱۸۱۰۰ و اجرای آن‌ها، همانطور که از شکل ۶ مشخص است، ضرب نیروی پسا (درگ) برای شبکه ۱۶۵۰۰ سلولی کمتر از ۱٪ اختلاف با شبکه ۱۸۱۰۰ سلولی دارد؛ لذا به منظور کاهش هزینه زمانی شبکه ۱۶۵۰۰ سلولی برای تحلیل مسأله در نظر گرفته شد.



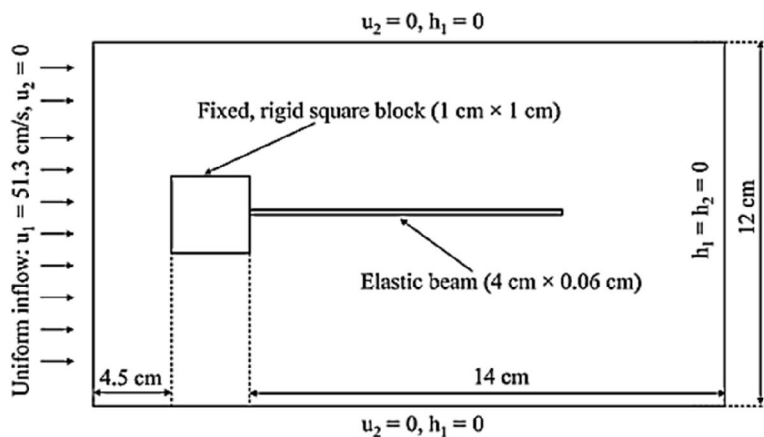
شکل ۴- تغییرات ضریب گشتاور پیچ بر حسب زاویه حمله نوسانی حول زاویه حمله اولیه (شماتیک)

می‌شود که توسط توابع تعریف شده توسط کاربر در حلقه محاسبات عددی گنجانده شده است. بدین ترتیب یک نوسان با دامنه زاویه‌ای مشخص (در اینجا ۵ درجه) حول زاویه حمله اولیه صفر درجه در نظر گرفته شده است و با استفاده از رابطه ۶، مقدار ضریب میرایی پیچ برای شرایط مختلف قابل محاسب خواهد بود.

#### ۴- نتایج و بحث

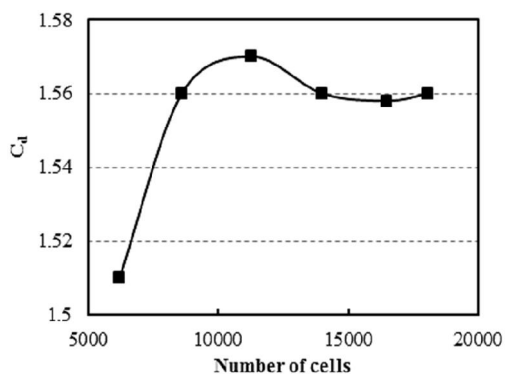
##### ۴-۱- اعتبارسنجی

در ابتدا برای اعتبارسنجی، یک صفحه الاستیک دو بعدی که بصورت تیر یک سردرگیر به انتهای یک مربع متصل است و

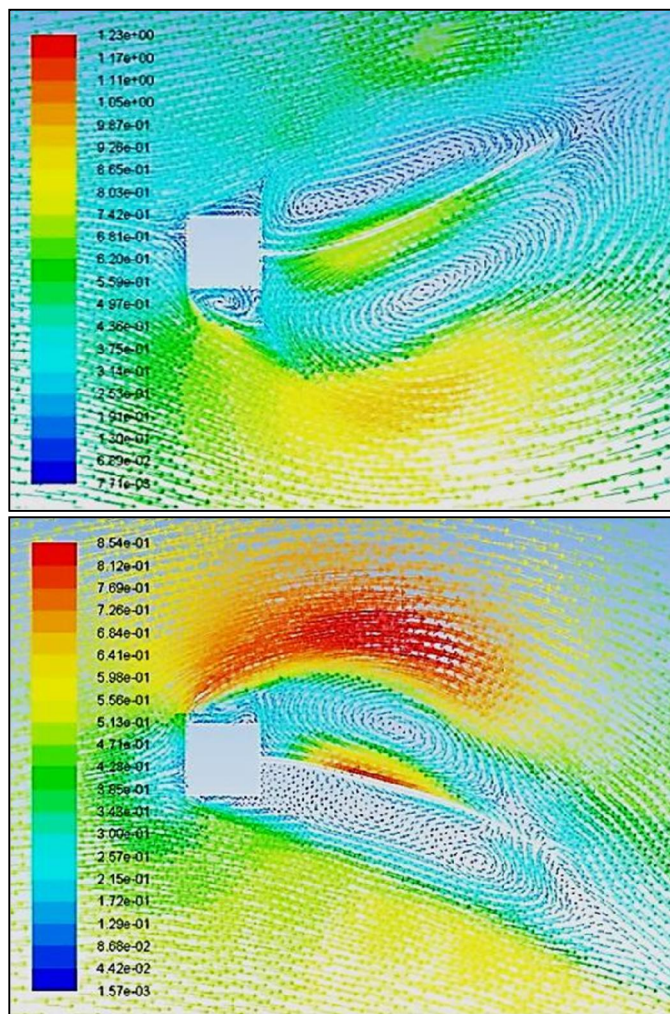


شکل ۵- هندسه مورد نظر و میدان اطراف آن [۱۹]

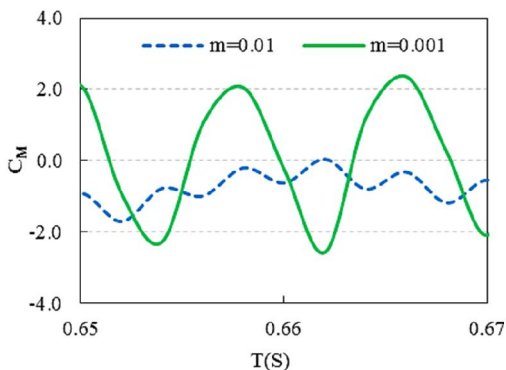
در شکل ۷ بردارهای سرعت در اطراف هندسه مورد نظر نشان داده شده است. در شکل مذکور، گردابه انتهایی صفحه که در اثر نوسان جدا شده است و همچنین گردابه بالای صفحه مشخص است که در اثر افت ناگهانی فشار ناشی از بالزنی صفحه ایجاد شده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصله، در شکل ۸ جابجایی عرضی نقطه انتهایی صفحه در طول زمان با مرجع [۱۹] مقایسه شده است. در شکل ۹ نیز، نیروی عرضی ناشی از نوسان صفحه در طی زمان با نتایج مرجع [۲۰] مقایسه شده است که نشان می‌دهد، نتایج از



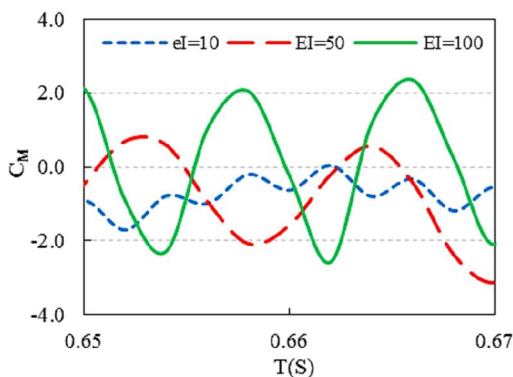
شکل ۶- مطالعه شبکه براساس تغییرات ضریب پسا



شکل ۷- بردارهای سرعت اطراف هندسه



شکل ۱۰- تغییرات ضریب گشتاور پیچشی صفحه بر حسب زمان بر اساس جرم های متفاوت صفحه

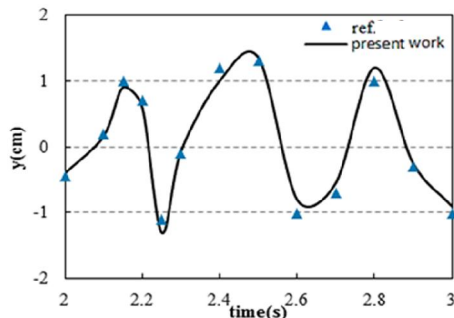


شکل ۱۱- تغییرات ضریب گشتاور پیچشی صفحه بر حسب زمان بر اساس سختی خمشی های (EI) متفاوت صفحه

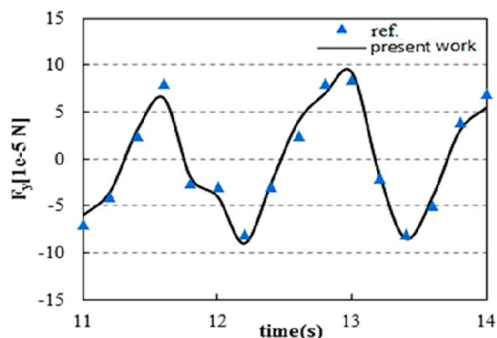
توجه به نتایج بدست آمده در حالت دوبعدی و مقایسه این نتایج با مراجع معتبر می‌توان کارایی محاسباتی و توانمندی کد توسعه داده شده در تحقیق حاضر را در شرایط دوبعدی مطلوب ارزیابی کرد.

#### ۴-۲- تحلیل در حالت سه‌بعدی

باتوجه به ماهیت سه‌بعدی فیزیک حاکم بر مسأله مورد نظر تحقیق، نیاز به توسعه کد در حالت سه‌بعدی بود که در ادامه این بخش به ارائه نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی در شرایط مختلف پرداخته خواهد شد. برای این منظور، یک استوانه سه بعدی به همراه یک نوار باریک انعطاف‌پذیر متصل به انتهای آن جهت بررسی تداخل سازه-سیال برای شرایط جریان با ماخ ۰/۴ و زاویه حمله ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است. دو



شکل ۸- مقایسه جابجایی عرضی نقطه انتهایی صفحه با مرجع [۱۹]



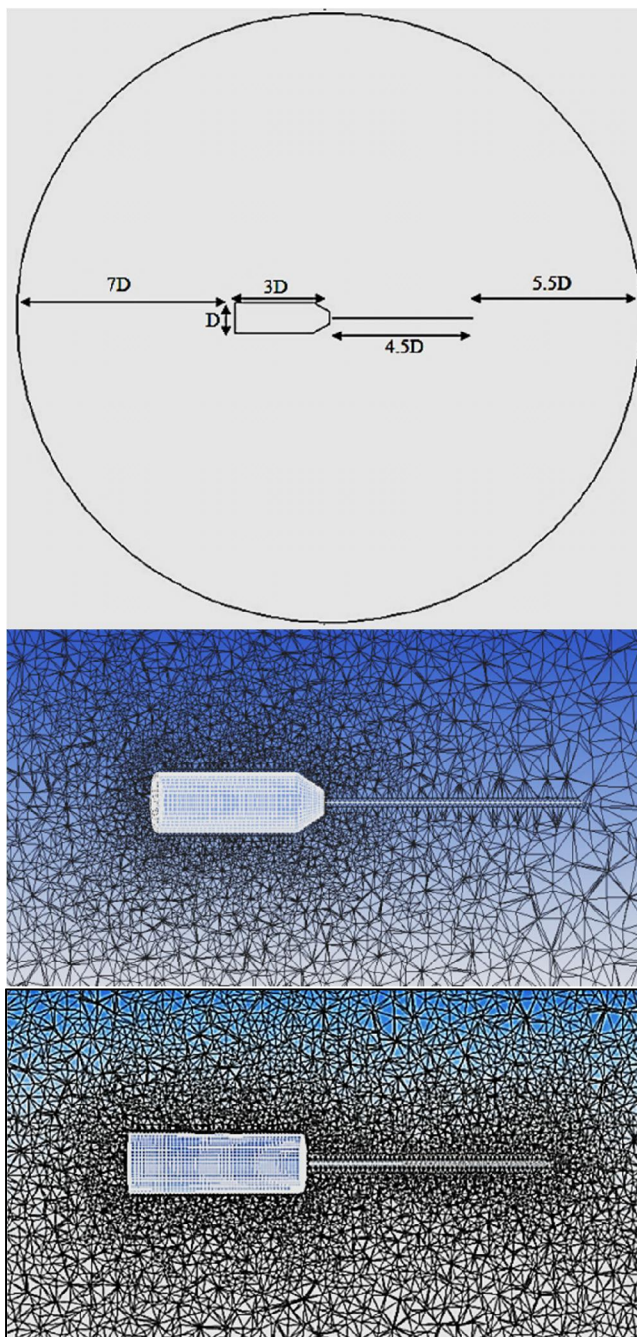
شکل ۹- مقایسه نیروی ناشی از نوسان صفحه با مرجع [۲۰]

دقت مناسبی برخوردار بوده و تطابق خوبی بین نتایج حاصله و نتایج مراجع وجود دارد. در ادامه تغییرات ضریب گشتاور صفحه بر حسب زمان بر اساس جرم‌ها و سختی خمشی‌های ( $EI = E \left(\frac{N}{m^2}\right) \times I(kg.m^2)$ ) متفاوت صفحه مطالعه شده است. در شکل ۱۰ برای دو جرم مختلف صفحه و سختی خمشی ۱۰ نیوتن کیلوگرم، ضریب گشتاور پیچ صفحه در طول زمان مقایسه شده است. در شکل ۱۱ برای سه حالت مختلف، از سختی خمشی صفحه و جرم ۰/۱ کیلوگرم، ضریب گشتاور پیچ در طول زمان مشخص شده است. از بررسی شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشخص است که با در نظر گرفتن سختی خمشی ثابت برای صفحه، هر چه جرم صفحه بیشتر گردد، فرکانس بالزنی آن افزایش یافته و دامنه نوسان آن کاهش می‌یابد؛ همچنین با در نظر گرفتن یک جرم ثابت برای صفحه، هرچه سختی خمشی آن افزایش یابد، فرکانس بالزنی کاهش یافته و دامنه نوسان افزایش می‌یابد. با



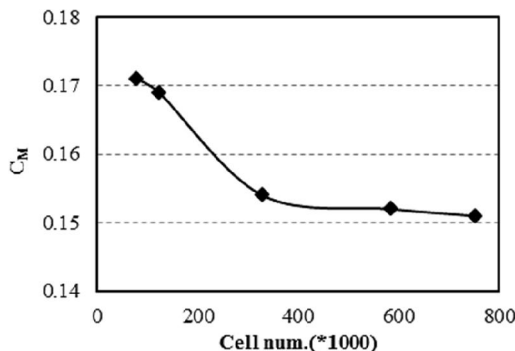
جواب‌ها به تعداد سلول‌های شبکه، چند نوع شبکه با تعداد سلول‌های مختلف مدل‌سازی و بررسی شده است که در شکل ۱۳ نتایج آن ارائه شده است.

نوع هندسه سه‌بعدی و میدان اطراف آن و همچنین شبکه ایجاد شده به منظور تحلیل مسئله در شکل ۱۲ مشخص شده است. به منظور اطمینان از دقت تحلیل و عدم وابستگی



شکل ۱۲- میدان حل و شبکه بندی حول جسم و ریبون از نمای نزدیک (دو نوع هندسه استوانه و استوانه مخروط)

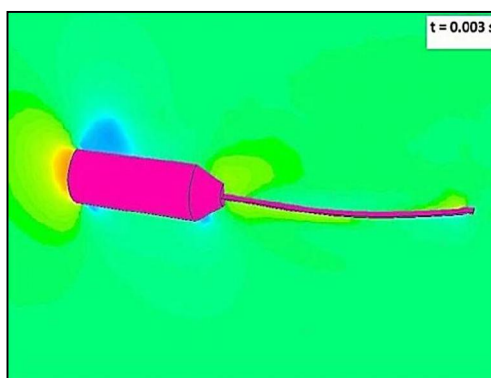
سلولی، ضریب گشتاور پیچ حدود ۱٪ اختلاف دارد که قابل چشم پوشی بوده و از آنجایی که مدل با ۵۸۶۰۰۰ سلول هزینه زمانی کمتری از مدل با ۷۵۳۰۰۰ سلول دارد، لذا همین شبکه برای تحلیل‌های بعدی انتخاب گردید. نتایج حاصل از بررسی دو نوع هندسه ذاتا ناپایدار (شکل ۱۴) نشان می‌دهد، هندسه استوانه مخروط شرایط پایداری بحرانی‌تری نسبت به هندسه استوانه ساده دارد؛ بنابراین حالت آزمایشی مناسبی برای مطالعه اثر پایدارکننده انعطاف‌پذیر بر دینامیک جسم است؛ لذا در ادامه این مقاله به ارائه نتایج و تحلیل پایداری این هندسه پرداخته می‌شود.



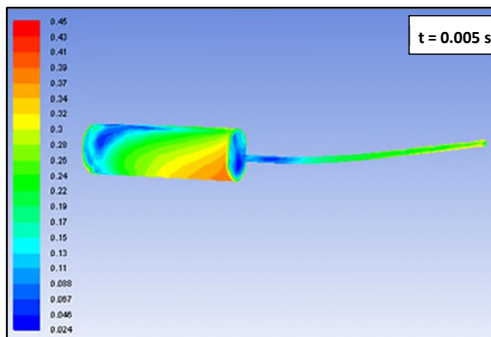
شکل ۱۳- ضریب گشتاور پیچ براساس تعداد سلول شبکه

#### ۴-۳- تحلیل پایداری جسم

جهت بررسی پایداری جسم چند حالت مختلف نوسان اجباری در عدد ماخ ۰/۴ به عنوان رژیم پروازی هدف بررسی می‌گردد. بدین منظور سرعت زاویه‌ای جسم را ۱۰ و ۲۰ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته و زاویه حمله جریان به دو صورت صفر و ۱۰ درجه در نظر گرفته می‌شود. دامنه زاویه‌ای نوسان اجباری نیز پنج درجه لحاظ می‌شود. در شکل ۱۵ خطوط هم‌تراز مقدار سرعت در اطراف جسم و ریبون در حال نوسان در لحظات مختلف نشان داده شده است.



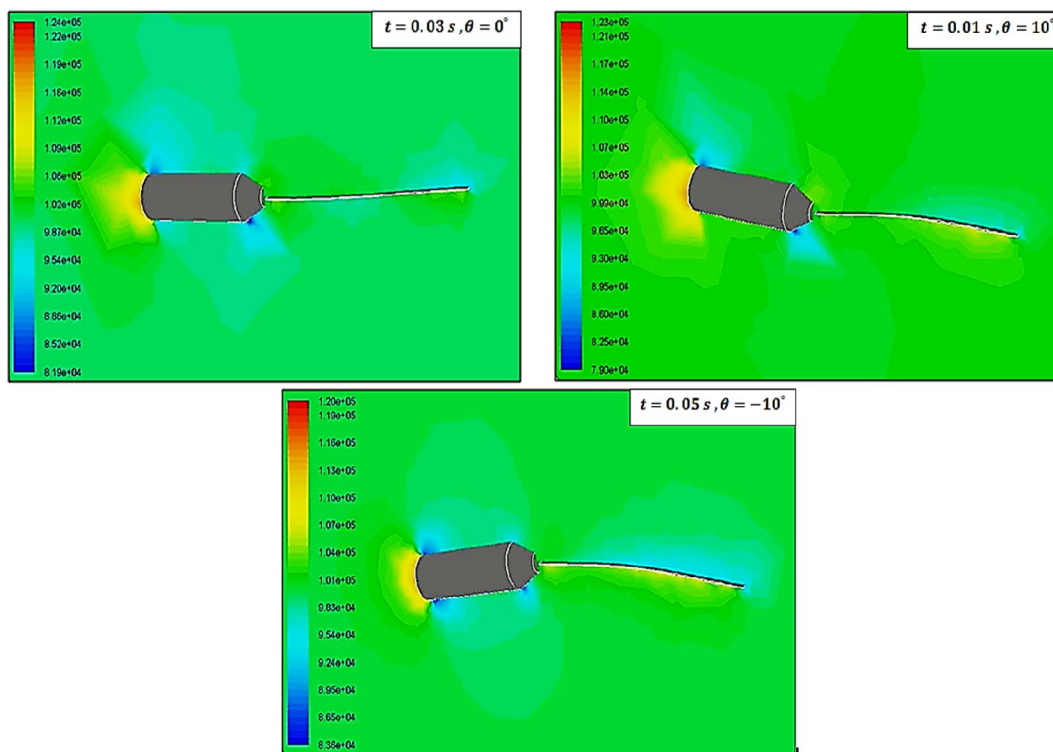
مقادیر ضریب گشتاور پیچ در لحظه‌های مختلف نوسانات اجباری جسم حول زاویه حمله صفر و ۱۰ درجه و به ازای سرعت‌های زاویه‌ای ۱۰ و ۲۰ رادیان بر ثانیه در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همانطور که در این نمودار مشخص است، بین زاویه حمله +۲ و -۲ جسم تقریباً دارای پایداری دینامیکی خنثی بوده، ولی در محدوده بالاتر و پایین از این زوایای حمله، جسم دارای پایداری دینامیکی مناسبی است. پس از محاسبه  $C_{mq} + C_{m\dot{\alpha}}$  با استفاده از رابطه ۶، مقادیر آن برای حالت‌های مختلف نوسانی، در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱۴- کانتورهای فشار لحظه‌ای در صفحه تقارن حول استوانه مخروط (پایین) و روی سطح استوانه (بالا) در حالت جسم ثابت

چنانچه از نتایج جدول مشخص است، تمامی مقادیر مشتق میرایی پیچ در شرایط مورد بررسی منفی است؛ لذا در کلیه حالت‌ها جسم دارای پایداری مناسبی بوده و نوار پایدارکننده انعطاف‌پذیر متصل به انتهای جسم توانسته است، وضعیت پایداری یک هندسه ذاتا ناپایدار را کاملاً دگرگون سازد.

تعداد پنج شبکه با تعداد سلول‌های متفاوت، مورد بررسی قرار گرفت که تعداد سلول‌ها ۷۸۰۰۰، ۱۲۳۰۰۰، ۳۲۹۰۰۰، ۵۸۶۰۰۰ و ۷۵۳۰۰۰ است. ضریب گشتاور پیچ را بر حسب تعداد سلول‌های هر شبکه رسم نموده و مشخص گردید، در مدلی که ۵۸۶۰۰۰ سلول دارد، در مقایسه با مدل ۷۵۳۰۰۰



شکل ۱۵- خطوط همتراز فشار لحظه ای در صفحه تقارن حول استوانه مخروط در حال نوسان اجباری پیچشی

در انتهای بخش نتایج برای بررسی میزان کارایی محاسبات انجام شده، مدت زمان متوسط هریک از تحلیل‌ها به منظور بررسی و مقایسه در حالات دوبعدی و سه بعدی، با وجود ریبون یا بدون آن ارائه می‌شود (جدول ۳). اجرای عددی حل با استفاده از یک دستگاه لپ تاپ با پردازشگر اینتل Core i5 ۲/۱ گیگاهرتز انجام شده است.

#### ۵- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله به ارائه روشی برای تحلیل نوسان پایدارکننده باریک انعطاف‌پذیر متصل به جسم در معرض جریان لزج فروصوت پرداخته شد. با توجه به اینکه اولین هدف این مقاله، ارائه الگوریتم ترکیبی مناسب برای تبادل اطلاعات بخش سیال و سازه بود، برای تحلیل اندرکنش سیال-سازه، الگوریتم ترکیبی چند بخشی تکراری برای برقراری ارتباط و تبادل اطلاعات میان بخش‌های سیال و سازه طراحی

#### جدول ۲- مقادیر مشتق میرایی پیچ برای

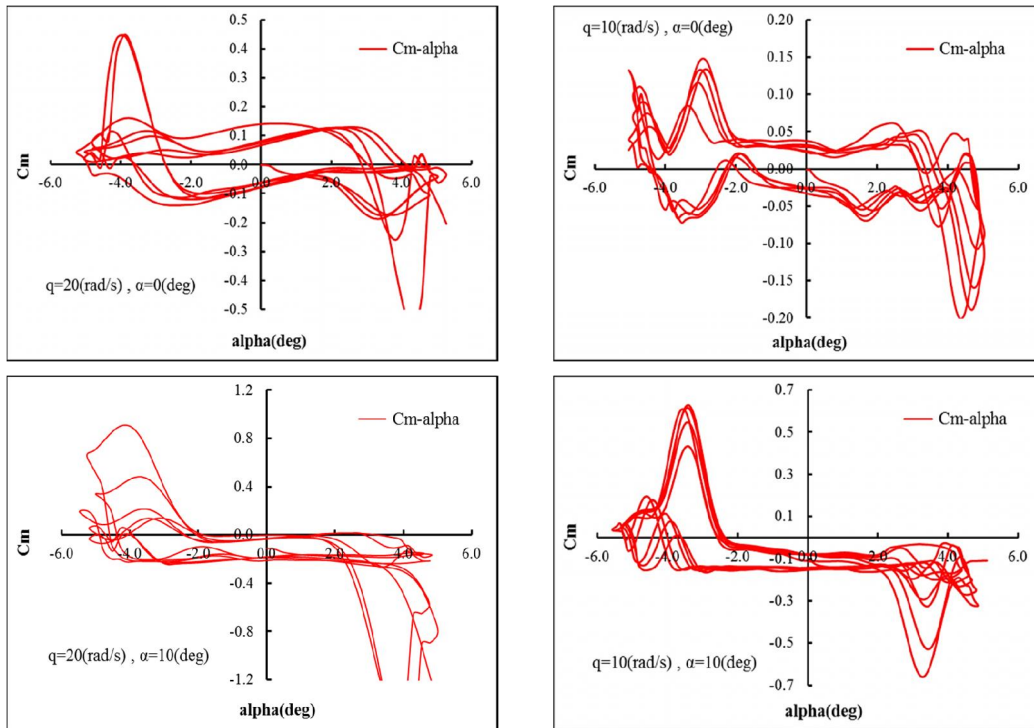
##### حالات مختلف نوسان

شرایط نوسان	$\alpha=0, q=10$	$\alpha=0, q=20$	$\alpha=10, q=10$	$\alpha=0, q=20$
$C_{mq} + C_{m\dot{\alpha}}$	-۶/۰	-۱۵/۰	-۵/۰	-۱۳/۵

#### جدول ۳- زمان متوسط اجرای حل عددی برای جسم بدون

##### پایدارکننده و به همراه پایدارکننده

حالت مسأله	دو بعدی	سه بعدی	وضعیت جسم
بدون ریبون	با ریبون	بدون ریبون	با ریبون
زمان حل (دقیقه)	۲۱	۲۴	۷۹
			۸۵



شکل ۱۶- ضریب گشتاور پیچ بر حسب زاویه نوسان حول زاویه صفر و ده درجه به ازاء سرعت زاویه‌ای ۱۰ rad/s و ۲۰ rad/s

## ۶- مراجع

- [1] Melzig HD, Saliaris C (1968) Pressure Distribution during Parachute Opening. Technical Reports AFFDL-TR-66-10.
- [2] Peterson CW, Strickland JH (1996) The fluid dynamics of parachute inflation. Annu. Rev Fluid Mechanics 28: 361-87.
- [3] Levin D, Daser G, Shpund Z (1997) On the aerodynamic drag of ribbons. AIAA-97-1525.
- [4] Lamar Auman M, Wayne Dahlke C (2000) Aerodynamic characteristics of ribbon stabilized grenades. 38th aerospace sciences meeting and exhibit, AIAA-270-2000.
- [5] Casadei F, Halleux JP (2001) Transient fluid-structure interaction algorithms for large industrial applications. Comput Method Appl M 190: 3081-3110.
- [6] Lamar Auman M, Brett Wilks L (2005) Application of Fabric Ribbons for Drag and Stabilization. Aerodynamic decelerator systems technology conference and seminar. AIAA-1618-2005.
- [7] Hou G, Wang J, Layton A (2012) Numerical methods for fluid-structure interaction. Commun Comput Phys 12(2): 337-371.

و بکارگیری شد. مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج معتبر نشان می‌دهد، معادله تیر یکسر درگیر اوپلر-برنولی برای تحلیل سازه مناسب بوده و الگوریتم ترکیبی چند بخشی تکراری برای برقراری ارتباط و تبادل اطلاعات میان بخش‌های سیال و سازه از دقت مناسب برخوردار است. نتایج حاصل از اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها نشان داد، چارچوب توسعه یافته با خطای کمتر از ۱۰ درصد، بخوبی فیزیک حاکم بر مسأله را تسخیر نموده و با استفاده از ابزار توسعه یافته در این تحقیق می‌توان مطالعات طراحی مرتبط را به خوبی انجام داد. در نهایت نیز، آنالیز پایداری به کمک نوسان اجباری برای جسم و بر اساس محاسبه ضریب میرایی پیچ جسم انجام پذیرفت و نتیجه گرفته شد که ترکیب جسم و صفحه انعطاف پذیر در کلیه حالات بررسی شده، دارای پایداری دینامیکی مناسبی است و نوار پایدارکننده انعطاف پذیر متصل به انتهای جسم توانسته است، وضعیت پایداری یک هندسه ذاتا ناپایدار را کاملاً دگرگون سازد.

- aeroelastic problems. *Comput Method Appl M* 182: 499-515.
- [16] Xu L, Wei L, Yunfei Zh (2015) Unsteady Vibration Aerodynamic Modeling and Evaluation of Dynamic Derivatives Using Computational Fluid Dynamics. Hindawi publishing Corporation mathematical problems in engineering, ID 813462.
- [۱۷] سپهوند پ، قاسملو س (۱۳۹۶) ارائه روند ضرایب دینامیکی دمپینگ رول و دمپینگ پیچ یک پرتابه در شرایط پروازی مختلف به روش عددی. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۱۹۶-۱۸۳ (۴): ۷.
- [18] Vishal A, Jubaraj S (2013) Numerical prediction of pitch damping stability derivatives for finned projectiles. Army Research Lab, ARL-TR-6725.
- [19] Bazilevs Y, Takizava K (2013) Computational fluid-structure interaction: Methods and applications. Wiley.
- [20] Hubner B, Walhorn E, Dinkler D (2004) A monolithic approach to fluid-structure interaction using space-time finite elements. *Comput Method Appl M* 193: 2087-2104.
- [8] Balde B, Etienne J (2011) The flapping of a flag, numerical investigation of a Kelvin-Helmholtz instability. 20<sup>th</sup> Congr`es Francais de M`ecanique.
- [9] Abderrahmane HA, Paidoussis MP (2011) Flapping dynamics of a flexible filament. *Physics Rev E* 84: 066604.
- [10] Auman LM, Dahlke CW (2011) Drag characteristics of ribbons. AIAA 2001-2011.
- [11] Kumar V, Udoewa V (2012) Fluid-structure interaction techniques for parachute.
- [12] Wang Y, Yu Z (2012) Numerical simulation of the flapping of a three dimensional flexible plate in uniform flow. *J Sound Vib* 331.
- [13] Revell A, Favier J (2013) A lattice boltzmann immersed boundary method to simulate the fluid interaction with moving and slender flexible objects. *J Comput Phys* 261: 145-161.
- [14] Viot E, Amandolese X (2013) Fluttering flags: An experimental study of fluid forces. *J Fluid Struct* 43: 385-401.
- [15] Farhat C, Lesoinne M (2000) Two efficient staggered algorithms for the serial and parallel solution of three-dimensional nonlinear transient