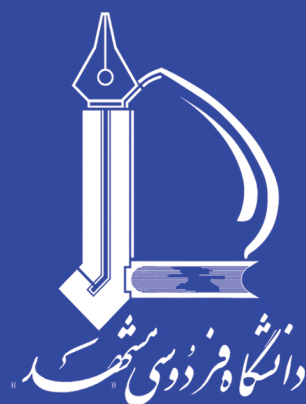


ISSN 2008 - 918X

- ۱ تأثیر تغییر خواص مواد بر رفتار خمشی ورق‌های چندلایه
میثم محمدی - مجتبی محمدی
- ۱۵ تعیین ماتریس جرم افزوده کشتی هوایی با استفاده از روش المان مرزی
علی جعفریان - محمدرضا علوی طباطبائی - سعید شاخصی
- ۲۹ اعمال روش کنترل جریان دمش و مکش به منظور کاهش ناپایداری‌های
ناشی از جریان سیلندر مربعی قرار گرفته بر روی بستر الاستیک
امیرحسین ربیعی - محمدرضا برزن - ابوالفضل محمدابراهیم
- ۴۵ پیش‌بینی جریان در دیفیوزر نامتقارن دو بعدی توسط شبکه عصبی و
مقایسه نتایج با سه مدل آشفتگی و داده‌های تجربی
مصطفی زمانی محی آبادی - فرید سلطانی - احمدرضا برومندپور
قنبرعلی شیخ زاده
- ۶۱ تحلیل عددی رفتار هیدرودینامیک اختلاط سه فازی پوسته برنج، شن و
هوا در بسترسیال حبایی با رفتار دانه‌ای ذرات
رضا کریمی احمدی - حمیدرضا نظیف
- ۸۷ شناسایی پارامترهای موتور خطی الکترومغناطیسی به منظور
تولید نیروی اینرسی
مهران مظفری جوین - سید علیرضا داودی ناوخ
بهنام معتکف ایمانی



نشریه علوم کاربردی و محاسباتی

در مکانیک

فصلنامه علمی

سال ۳۴، شماره ۲

تابستان ۱۴۰۱

شماره پیاپی ۲۸

هیئت تحریریه:

دانشیار، دانشگاه آرام آی تی، استرالیا	دکتر اکبر آفاقی خطیبی
دانشیار، دانشگاه استرالیای جنوبی، استرالیا	دکتر کاظم ابهری
استاد، دانشگاه آرام آی تی، استرالیا	دکتر علی اکبر اکبرزاده
استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوا فضا	دکتر مسعود برومند
دانشیار، دانشگاه سوانزی، انگلستان	دکتر حامد حداد خداپرست
استاد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک	دکتر سید محمد رضا خلیلی
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر احسان روحی
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر محمود شریعتی
استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک	دکتر ابراهیم شیرانی چهارسوقی
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر مسعود طهانی
استاد، دانشگاه کالیفرنیا، گروه بیومکانیک سلول مولکولی، آمریکا	دکتر محمد رضا کاظم پور مفرد
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر مهران کدخدایان
دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر حمید معین فرد
استاد، دانشگاه نیوکاسل، استرالیا	دکتر بهداد مقتدری
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر محمد رضا مه پیکر
استاد، دانشگاه کنسا مریتا، آمریکا	دکتر سیمین ناصری
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر حمید نیازمند

ویراستار: دکتر یوسف بینا

ویرایش و صفحه آرایی: سیده عاطفه نوعی

کارشناس نشریه: تکتم هوشمند

نشانی: مشهد - دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده مهندسی - دفتر نشریه - صندوق پستی: ۱۱۱۱-۹۱۷۷۵

دورنگار: ۰۵۱-۳۸۷۶۳۳۰۱

تلفن: ۰۵۱-۳۸۸۰۶۰۲۴

وب سایت: <http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir>

پست الکترونیکی: mechanic-ferdowsi@um.ac.ir

شماره نامه مجوز وزارت علوم، تحقیقات و فناوری: ۱۳۳۳۷۵ مورخ ۱۳۹۰/۷/۱۹

نمایه شده در پایگاه‌های معتبر: EBSCO, Magiran, SID, ISC

فهرست مطالب

۱	میثم محمدی - مجتبی محمدی	تأثیر تغییر خواص مواد بر رفتار خمشی ورق‌های چندلایه
۱۵	علی جعفریان - محمدرضا علوی طباطبایی سعید شاخصی	تعیین ماتریس جرم افزوده کشتی هوایی با استفاده از روش المان مرزی
۲۹	امیرحسین ربیعی - محمدرضا برزن ابوالفضل محمدابراهیم	اعمال روش کنترل جریان دمش و مکش به منظور کاهش ناپایداری‌های ناشی از جریان سیلندر مربعی قرار گرفته بر روی بستر الاستیک
۴۵	مصطفی زمانی محی‌آبادی - فرید سلطانی احمدرضا برومندپور - قنبرعلی شیخ زاده	پیش‌بینی جریان در دیفیوزر نامتقارن دو بعدی توسط شبکه عصبی و مقایسه نتایج با سه مدل آشفتگی و داده‌های تجربی
۶۱	رضا کریمی احمدی - حمیدرضا نظیف	تحلیل عددی رفتار هیدرودینامیک اختلاط سه فازی پوسته برنج، شن و هوا در بسترسیال حبایی با رفتار دانه‌ای ذرات
۸۷	مهران مظفری جوین - سید علیرضا داودی ناوخ بهنام معتکف ایمانی	شناسایی پارامترهای موتور خطی الکترومغناطیسی به منظور تولید نیروی اینرسی

The Effect of Material Degradation on the Bending of Laminated Plates

Research Article

Meisam Mohammadi¹ Mojtaba Mahmoodi²

1. Introduction

Due to the development and advances in various fields of engineering, applying materials with special characteristics is considerable. Low weight, different mechanical, chemical and physical properties of composites in comparison with the isotropic materials, leads to wide utility of composite materials in industry. Environmental conditions affect the composite products and therefore un-expected behaviors are seen.

Moisture, heat, magnetic field, X-rays, infrared rays, UV rays, flams etc. are some of the important environmental parameters. In marine and aviation industries, heat and moisture are some of the most important environmental conditions that affect the efficiency of structures. Thus, study of the variation in behavior of composite structures in hygrothermal environment is evitable.

In the present study, using the available model of material degradation in the literature due to the hygrothermal conditions, bending of laminated plates is investigated. Variations of elasticity modulus and coefficient of thermal expansion due to the heat and moisture are considered in the used material degradation model.

2. Equilibrium equations

In order to derive the governing equilibrium equations for bending analysis of laminated plate, classical plate theory is used. Based on this theory, the components of displacement field are

$$\begin{aligned} u_1(x, y, z) &= u - zw_{,x} & u_2(x, y, z) &= v - zw_{,y} \\ u_3(x, y, z) &= w(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

In equation (1), u_1 , u_2 and u_3 are components of displacement field in z distance of midplane in x , y and z direction, respectively.

Using the principle of minimum total potential energy, the governing equation for bending analysis of symmetric laminated cross plate is obtained as

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + (2D_{12} + 4D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q(x, y) \quad (2)$$

In the above equation, $q(x, y)$ is the distributed load on the surface of plate and D constants are the equivalent flexural rigidity in various directions.

3. Material degradation in hygrothermal environment

For studying the effect of environmental conditions on the mechanical properties of composite plate, the experimental model proposed by Chamis is used. According to this model, the elasticity modulus and coefficient of thermal expansion are affected in hygrothermal situation.

Therefore, the degraded elasticity modulus is

$$E_{new} = E_0 \sqrt{\frac{T_{GW} - T}{T_{GD} - T}} \quad (3)$$

In which T denotes temperature and the subscript GW and GD show the glass transition temperature in wet and dry states. The glass transition temperature is related to the moisture content through the following relation

$$T_{GW} = (0.005M_m^2 - 0.1M_m + 1)T_{GD} \quad (4)$$

In equation (4), M_m is the moisture absorbed by the polymer composite.

4. Exact solution

Levy solution is used for determining the exact solution. According to this solution, it is assumed that plate is simply supported along all edges and double series solution is applied so that the deflection of plate is

$$W_{mn} = \frac{4P_0 \left(-1 + \cos\left(\frac{m\pi}{a}\right) \right) \left(-1 + \cos\left(\frac{n\pi}{b}\right) \right)}{ab \left(\frac{m\pi}{a} \right) \left(\frac{n\pi}{b} \right) \left(D_{11} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^4 + \dots \right.} \quad (5)$$

$$\left. \dots \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 (2D_{12} + 4D_{66}) + D_{22} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^4 \right)$$

5. Numerical results

For numerical study, it is assumed that laminated plate is composed of epoxy and graphite fibers. The material properties are tabulate in Table 1 as [1]:

Table 1. Material properties of Composite

Fiber	Density	1744kg/m3
	Longitudinal modulus	0.21GPa
	Transverse modulus	0.014GPa
	Shear modulus	0.014GPa
	Poisson's ratio	0.41
Matrix	Density	1273kg/m3
	Elasticity modulus	0.0034GPa
	Poisson's ratio	0.44

*Manuscript received: 16 April 2021; Revised, 08 May 2021, Accepted, 30 May 2021.

¹ Corresponding author: Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. Email: meisam.mohammadi@vru.ac.ir.

² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

In Table 2, nondimensional maximum deflection $\left(\bar{W} = \frac{WE_{f11}}{P_0b}\right)$ is presented for various parameters.

According to this table, it is seen that increasing the volume fraction of fibers increases the nondimensional deflection. While increasing the volume fraction of void decreases the nondimensional deflection.

In figure 1, variation of nondimensional deflection versus the change of temperature and moisture content is plotted. According to the figure, increasing the temperature severely decreases the nondimensional deflection.

Table 2. Nondimensional deflection of laminated plate (0/90/0)

$\frac{a}{b}$	$V_f\%$	$V_v\%$	$(T, RHR\%)$			
			(0,0)	(50,10)	(50,30)	(50,70)
0.5	30	0	176.8	179.5	180.4	182.2
		5	177.6	180.3	181.2	183.0
	70	0	79.41	79.89	79.96	80.11
		5	79.64	80.09	80.17	80.32
1	30	0	2211	2294	2324	2381
		5	2225	2308	2338	2398
	70	0	1031	1049	1052	1058
		5	1035	1053	1056	1062

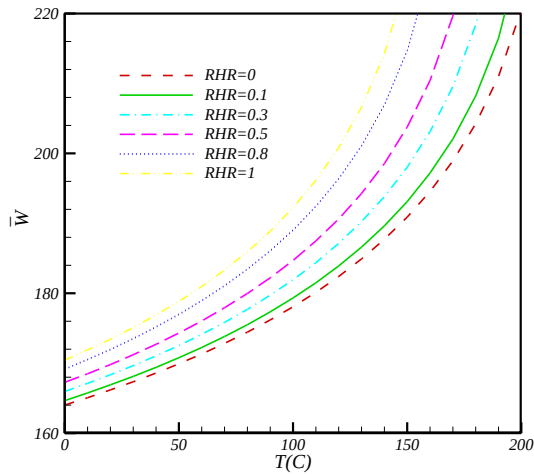


Figure 1. Variation of nondimensional deflection versus the change of moisture and temperature for rectangular ($a/b=0.5$) laminated composite plate (90/0/90)

Also, increasing the moisture content leads to increasing the nondimensional deflection, which is due to the growing up the weight. Numerical results show that increasing temperature and moisture content significantly decreases the bending stiffness of laminated plate. In

addition, the effect of temperature is more evident in comparison with the moisture.

In Figure 2, the variation of nondimensional deflection versus the change of void content is depicted. It is clear that the deflection increases as the void content increases.

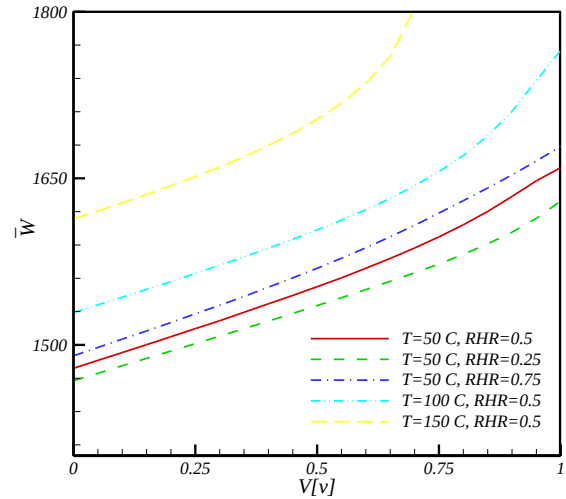


Figure 2. Variation of nondimensional deflection with respect to the void volume fraction for square laminated composite plate (0/90/0)

تأثیر تغییر خواص مواد بر رفتار خمشی ورق‌های چندلایه*

مقاله پژوهشی

میشم محمدی^(۱)مجتبی محمودی^(۲)

چکیده در پژوهش حاضر به بررسی و مطالعه تغییرات خواص مواد در محیط‌های گرم و مرطوب و تأثیر آن بر رفتار خمشی ورق‌های چندلایه کامپوزیتی پرداخته شده است. حرارت و رطوبت از جمله عوامل محیطی هستند که بر خواص مکانیکی مواد پلیمری تأثیر زیادی دارد و در نتیجه موجب تغییر رفتار چندلایه‌های کامپوزیتی پایه پلیمری می‌شود. به منظور بررسی این تغییر رفتار، یک چندلایه کامپوزیتی بر اساس فرضیات کیرشهف و تئوری ورق‌های نازک، مدل‌سازی و معادلات حاکم بر خمش چندلایه استخراج شده است. سپس معادله حاکم، برای ورق چندلایه با شرایط مرزی چهار طرف تکیه‌گاه ساده به صورت دقیق حل شده و پاسخ بسته برای بررسی‌های عددی مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور بررسی تأثیر عوامل محیطی بر روی خواص مکانیکی این ورق‌ها، از مدل‌های تجربی ارائه شده در پژوهش‌های گذشته استفاده شده است. در انتها، به منظور بررسی بیشتر، تأثیر عوامل دیگر از جمله نظیر ابعاد ورق چندلایه، دما، رطوبت نسبی، کسر حجمی الیاف، کسر حجمی حفره و لایه چینی روی خیز بیشینه ورق چندلایه مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییر میزان رطوبت نسبی یا دما خواص مکانیکی را به طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد و رفتار ورق چندلایه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی ورق‌های چندلایه کامپوزیتی، تغییر خواص ماده، محیط گرم و مرطوب، خمش.

مقدمه

با توجه به گستردگی صنایع و پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌های مختلف مهندسی، استفاده از مواد با قابلیت‌های کاری خاص همواره مورد توجه بوده است. مواد مرکب (Composites) با ویژگی‌های خاصی نظیر سبک بودن، خواص مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی متفاوت در مقایسه با مواد همسانگرد (Isotropic)، به طور خاص در صنایع مختلف به کار گرفته می‌شوند.

از جمله عوامل محیطی می‌توان به رطوبت، حرارت، میدان مغناطیسی، پرتوهای اشعه ایکس (X rays)، امواج مادون قرمز (Infrared rays)، امواج ماوراءبنفش (Ultra Violet or UV rays)، شعله مستقیم آتش و... اشاره کرد [1]. در صنایع هوایی و دریایی، حرارت و رطوبت از مهم‌ترین و اثرگذارترین شرایط محیطی هستند که می‌توانند بر رفتار تجهیزات و سازه‌های مهندسی اثرات نامطلوب بگذارند.

مالیک (Mallick) در مطالعه‌ای نشان داده که وقتی که یک نمونه پلیمری در دمای بالا تحت آزمایش کشش قرار می‌گیرد، مدول و استحکام آن با افزایش دما کاهش می‌یابد که دلیل آن به

موضوع نرمی حرارتی (Thermal softening) برمی‌گردد [1]. هم‌چنین در یک ماده مرکب تقویت‌شده با ماتریس پلیمری (Polymer Matrix) و با الیاف، خواص مؤثر و مهم فاز زمینه یا ماتریس در مقایسه با خواص مهم و مؤثر فاز تقویت کننده یا الیاف، بیشتر تحت تأثیر افزایش دما هستند. به عنوان مثال، استحکام طولی و مدول تک‌جهته (Unidirectional) (با زاویه الیاف صفر) تقریباً با افزایش دما بدون تغییر باقی می‌ماند، در صورتی که خواص عرضی و خارج از محور آن به میزان قابل توجهی با افزایش دما و رسیدن به دمای انتقال شیشه‌ای (Glass transition temperature or T_g) پلیمر کاهش می‌یابد.

دوین (Devine) عوارض پیرسازی حرارتی (Thermal aging) بر استحکام خمشی باقی مانده در چندلایه‌های SMC-R شامل چهار نوع متفاوت از رزین‌های پلی‌استر ترموست و یک نوع رزین وینیل استر را گزارش داد [2]. در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد، همه چندلایه‌های SMC-R بیش از ۸۰ درصد استحکام خمشی در دمای اتاق را حتی بعد از گذشت زمان ۱۲ ماه حفظ می‌کند. در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، تمام لایه‌های SMC-R تغییرات خواص و زوال را نشان دادند. به هر حال

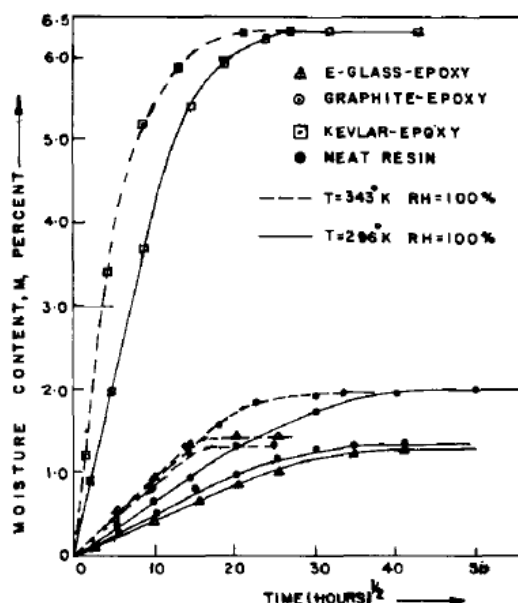
* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۰۳/۹ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان.

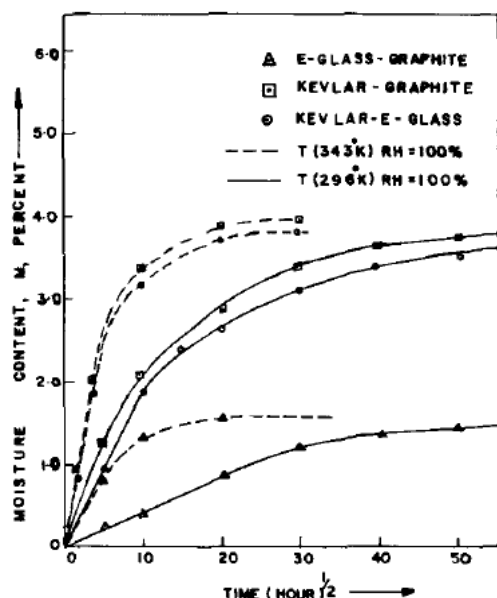
Email: meisam.mohammadi@vru.ac.ir

(۲) استادیار گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی بم، بم، ایران.

گرم و مرطوب ارائه گردید. در این تحقیق اشاره‌ای به تغییرات خواص چندلایه‌ها و اثر زاویه الیاف روی تغییر خواص مکانیکی چندلایه‌ها در محیط‌های حرارتی-رطوبتی نشده است.



شکل ۱ منحنی جذب رطوبت نسبت به زمان برای کامپوزیت‌های ساده [4]



شکل ۲ منحنی جذب رطوبت نسبت به زمان برای کامپوزیت‌های هیبریدی [4]

آزمایش‌های انجام شده به وسیله گیلات و بروتمان (Gillat and Broutman) روی چندلایه‌های کامپوزیتی متقاطع اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن، نشان می‌دهد که نزدیک ۲۵ درصد

چندلایه‌های وینیل استر دارای استحکام باقی‌مانده بیشتری در مقایسه با همه چندلایه‌های پلی‌استر می‌باشد.

بلاید و همکارانش (Belaid et al.) به بررسی خواص مکانیکی پلی‌استر تقویت‌شده با الیاف شیشه تحت پیرسازی حرارتی تسریع یافته پرداختند [3]. آزمایش موردنظر در دوره‌های زمانی ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روزه انجام شد. هم‌چنین دمای پیرسازی نیز در ۸۰ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شده بود. آن‌ها مشاهده کردند که خواص مکانیکی به‌شدت تحت تأثیر پیرسازی حرارتی قرار دارد. با افزایش زمان پیرسازی، مدول الاستیک حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و تنش گسیختگی حدود ۲۲ درصد کاهش پیدا می‌کند. آن‌ها دلیل این تغییرات را به رفتار میکرو ساختاری ماتریس و هم‌چنین اتصال بین الیاف و ماتریس نسبت دادند.

گوپالان و همکارانش (Gopalan et al.) به بررسی تأثیر شرایط محیطی بر رفتار مواد مرکب تقویت‌شده با الیاف پرداختند [4]. در آزمایش انجام شده، نمونه‌هایی با ابعاد ۲۵*۲۵ میلی-متر به‌منظور بررسی مشخصه‌های جذب رطوبت توسط مواد مرکب استفاده شد. افزایش وزن نمونه‌ها به‌صورت متناوب تا زمان رسیدن به حالت اشباع مورد بررسی قرار گرفت. درصد افزایش وزن نمونه‌ها نسبت به نمونه خشک محاسبه شد. بیشترین غلظت رطوبت در اپوکسی شسته شده و رزین پلی‌استر و هم‌چنین کامپوزیت‌های تقویت‌شده ساده (شیشه نوع E)-اپوکسی، گرافیت-اپوکسی و کولار-اپوکسی و کامپوزیت‌های تقویت‌شده هیبریدی (شیشه نوع E)-گرافیت-اپوکسی، گرافیت-کولار-اپوکسی و کولار-شیشه (نوع E)-اپوکسی در دماهای ۲۶۹ و ۳۴۳ درجه کلونین (به‌ترتیب ۴/۱۵- و ۶۹/۸۵ درجه سانتی‌گراد) تعیین شدند. منحنی‌های جذب رطوبت نسبت به زمان برای کامپوزیت‌های ساده و هیبریدی در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند.

چامیس (Chamis) بر اساس تحلیل‌های میکرومکانیکی و ماکرومکانیکی، به تعیین روابط حاکم بر خواص مکانیکی معادل یک تک لایه بر اساس پارامترهای مؤثر در ساختار آن پرداخت [5]. اثر پارامترهایی نظیر کسر حجمی الیاف، میزان حفره، دما و رطوبت روی تغییرات خواص مکانیکی و حرارتی تک‌لایه مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین بر اساس آزمایش‌های تجربی، روابطی به‌منظور تغییر خواص مکانیکی تک لایه در محیط‌های

تعیین و بررسی تغییرات خواص مکانیکی و فیزیکی چندلایه‌های کامپوزیتی در محیط‌های حرارتی-رطوبتی و نقش آن‌ها در تغییر خیز ورق‌های کامپوزیتی پرداخته شده‌است.

معادلات تعادل

در این پژوهش، ورق چندلایه مورد تحلیل بر پایه تئوری ورق‌های نازک مدل‌سازی شده‌است. براساس فرضیات کیرشهف (Kirchhoff hypothesis) مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u_1(x, y, z) = u - zw_{,x}$$

$$u_2(x, y, z) = v - zw_{,y}$$

$$u_3(x, y, z) = w(x, y)$$

(۱)

در رابطه (۱) عبارات u_1 ، u_2 و u_3 به ترتیب مؤلفه‌های جابه‌جایی هر نقطه دل‌خواه به فاصله z از صفحه میانی به ترتیب در جهات x ، y و z می‌باشد. همچنین u ، v و w مؤلفه‌های جابه‌جایی صفحه میانی ورق هستند که تابعی از متغیرهای x و y بوده و زیرنویس (r) نشان‌دهنده عملگر مشتق‌گیری نسبت به متغیر متناظر است.

با استفاده از فرضیات فون کارمن و با در نظر گرفتن فرم خطی معادلات کرنش جابه‌جایی، مؤلفه‌های کرنش عبارتند از:

$$\bar{\epsilon}_{xx} = u_{,x} - zw_{,xx}$$

$$\bar{\epsilon}_{yy} = v_{,y} - zw_{,yy}$$

$$2\bar{\epsilon}_{xy} = (u_{,y} + v_{,x}) - 2zw_{,xy}$$

(۲)

با استفاده از اصل حداقل انرژی پتانسیل و بر پایه اصول حساب تغییرات، معادلات تعادل ورق مستطیلی نازک به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\delta u: N_{xx,x} + N_{xy,y} = 0 \quad (۳-۱)$$

$$\delta v: N_{xy,x} + N_{yy,y} = 0 \quad (۳-۲)$$

$$\delta w: (M_{xx,x} + M_{xy,y})_{,x} + (M_{yy,y} + M_{xy,x})_{,y} = q(x, y) \quad (۳-۳)$$

در رابطه (۳-۳)، $q(x, y)$ بار گسترده بر واحد سطح ورق می‌باشد. همچنین نیروها و ممان‌های منتجه به صورت زیر تعریف می‌شوند:

استحکام برشی میان لایه‌ای با افزایش ۱/۵ درصد وزنی غلظت رطوبت کاهش می‌یابد [6].

لورا اس-تلیک (Laura Svetlik) در مطالعه‌ای تجربی به بررسی تغییرات خواص مواد مرکب تقویت‌شده با الیاف شیشه و ماتریس پلیمری وینیل استر پرداخت و توانست خواص مکانیکی این ماده و تغییرات این خواص تحت تأثیر دما و رطوبت را اندازه‌گیری و ثبت کند [7]. با کمک گرفتن از نتایج ارائه‌شده در این تحقیق، و با استفاده از تکنیک برازش منحنی (Curve fitting) می‌توان توابع تقریبی برای تغییر خواص معادل ماده مرکب تعیین کرد.

بیتنر و همکارانش (Bittner et al.) به بررسی اثرات محیطی به خصوص حرارت روی تغییر خواص و رفتار پنل‌های شیشه‌ای بکار رفته در ساختمان‌های بلند بر اساس مدل‌سازی عددی و تجربی پرداختند [8].

زمانی و حیدری (Zamani and Heidari) به بررسی تحلیلی شکست کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای بر اساس روش‌های مختلف تغییر مواد پرداختند [9]. معیار شکست هاشین در این تحلیل مورد استفاده قرار گرفت. رفتار هر لایه تحت بارگذاری به دقت بررسی و تغییر رفتار مواد با کمک مدل‌های مختلف تغییر خواص مواد مورد تحلیل قرار گرفت. در نهایت، نمودارهای تحلیلی نیرو-جابه‌جایی برای مدل‌های مختلف تغییر خواص مواد با یکدیگر مقایسه گردید.

مختار و بوآزا (Bouazza and Zenkour) به تحلیل ارتعاشات ورق‌های چندلایه ضخیم بر اساس تئوری برشی مرتبه بالا پرداختند [10]. در این تحلیل به بررسی اثر هم‌زمان تغییر رطوبت و دما بر خواص و همچنین فرکانس‌های ورق چندلایه پرداخته شده‌است.

سینگ و زنکور (Singh and Zenkour) به بررسی اثرات محیط‌های گرم و مرطوب بر تغییر پاسخ دینامیکی ورق‌های چندلایه پرداختند [11]. زاویه الیاف به صورت متعامد و هم‌چنین تغییر خواص ماده در نظر گرفته شده بود.

با توجه به مرور انجام گرفته، مطالعه رفتار و تغییر خواص چندلایه‌های کامپوزیتی در محیط‌های حرارتی-رطوبتی امری مهم و تأثیرگذار در تحلیل کامپوزیت‌ها می‌باشد. از آنجایی که خواص مکانیکی و فیزیکی چندلایه‌ها مورد مطالعه دقیق قرار نگرفته‌است، لذا در این تحقیق با فرضیات چندلایه‌های نازک، به

$$\begin{aligned}
 Q_{12} &= (C_{11} + C_{22} - 4C_{66})m^2n^2 + C_{12}(m^4 + n^4) \\
 Q_{22} &= C_{11}n^4 + 2(C_{12} + 2C_{66})m^2n^2 + C_{22}m^4 \\
 Q_{16} &= (C_{11} - C_{12} - 2C_{66})m^3n \\
 &\quad + (C_{12} - C_{22} + 2C_{66})mn^3 \\
 Q_{26} &= (C_{11} - C_{12} - 2C_{66})mn^3 \\
 &\quad + (C_{12} - C_{22} + 2C_{66})m^3n \\
 Q_{66} &= (C_{11} + C_{22} - 2C_{12} - 2C_{66})m^2n^2 \\
 &\quad + C_{66}(m^4 + n^4)
 \end{aligned} \quad (۹)$$

در روابط (۹) m و n به ترتیب سینوس و کسینوس راستای الیاف با راستای اصلی می‌باشد.

بنابراین، نیروها و ممان‌های متوجه ساده شده عبارتند از:

$$\begin{aligned}
 N_{ij} &= \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \sigma_{ij}^k dz, (ij = xx, yy, xy) \\
 M_{ij} &= \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} z \sigma_{ij}^k dz, (ij = xx, yy, xy)
 \end{aligned} \quad (۱۰)$$

با ساده‌سازی معادلات (۱۰) می‌توان نوشت:

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \\ M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ & A_{22} & A_{23} & B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ & & A_{33} & B_{13} & B_{23} & B_{33} \\ & & & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ & & & & D_{22} & D_{23} \\ & & & & & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x \\ v_y \\ u_y + v_x \\ -w_{xx} \\ -w_{yy} \\ -2w_{xy} \end{Bmatrix}$$

(۱۱)

که در آن

$$\begin{aligned}
 (A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) \\
 = \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix} (1, z, z^2) dz \\
 i, j = 1, 2, 3
 \end{aligned} \quad (۱۲)$$

$$\begin{aligned}
 (N_{xx}, N_{yy}, N_{xy}) &= \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}) dz \\
 (M_{xx}, M_{yy}, M_{xy}) &= \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}) z dz
 \end{aligned} \quad (۴)$$

لازم به ذکر است که با توجه به فرضیات مطالعه حاضر، و این‌که فرض شده است که ورق چندلایه روی تمام لبه‌ها دارای تکیه‌گاه ساده می‌باشد، لذا خیز و ممان خمشی برای تمام لبه‌ها باید صفر باشد.

معادلات حاکم بر چندلایه کامپوزیتی

با توجه به معادلات ساختاری برای یک تک لایه تقویت شده با الیاف، تنش و کرنش ورق تک لایه به صورت زیر به یکدیگر مرتبط می‌شود [12]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (۵)$$

که در آن ماتریس $[C]$ نشان‌دهنده ماتریس سفتی برای ورق اورتوتروپیک می‌باشد و درایه‌های آن برحسب ثوابت مهندسی تک لایه اورتوتروپیک عبارتند از:

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, C_{12} = C_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\
 C_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, C_{66} = G_{12}
 \end{aligned} \quad (۶)$$

در معادله (۶)، E و G به ترتیب مدول الاستیسیته و برشی و ν ثابت پواسون می‌باشد.

با توجه به لایه‌چینی صورت گرفته در تشکیل ورق چندلایه و همچنین راستای الیاف با مختصات اصلی مسئله، برای لایه k ام چندلایه، معادلات تنش کرنش به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\{\sigma\}^k = [Q]^k \{\varepsilon\}^k \quad (۷)$$

که در آن $[Q]^k$ ماتریس تبدیل یافته سفتی پس از ساده سازی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$[Q]^k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix}^k \quad (۸)$$

که

$$Q_{11} = C_{11}m^4 + 2(C_{12} + 2C_{66})m^2n^2 + C_{22}n^4$$

خواص تک لایه، بر پایه آزمایش‌های تجربی روابطی برای تغییرات خواص مکانیکی تک‌لایه‌ها پیشنهاد شده‌است. طبق روابط میکرومکانیکی ارائه شده، دانسیته لایه کامپوزیت برابر است با:

$$\rho_L = \rho_m V_m + \rho_f V_f \quad (14)$$

در رابطه فوق، پایین‌نویس‌های f ، m و L به ترتیب مربوط به الیاف، ماتریس و چندلایه می‌باشد. همچنین p و V نشان‌دهنده دانسیته و کسر حجمی الیاف می‌باشد. به علاوه، خواص مکانیکی چندلایه عبارتند از:

$$\begin{aligned} E_{L11} &= E_m V_m + E_{f11} V_f \\ E_{L22} &= \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f} \left(1 - \frac{E_m}{E_{f22}}\right)} \end{aligned} \quad (15)$$

که در آن E نماینده مدول الاستیسیته و (11) و (22) نشان‌دهنده راستای طولی و عرضی می‌باشد.

بر پایه یافته‌های چامیس، خواص مکانیکی مانند مدول الاستیسیته یک ماتریس پلیمری در محیط‌های حرارتی و رطوبتی تابعی از دمای انتقال شیشه‌ای و همچنین خواص مکانیکی در حالت مرجع و خشک می‌باشد. طبق روابط ارائه شده، مدول الاستیسیته در محیط جدید عبارت است از:

$$E_{\text{new}} = E_0 \sqrt{\frac{(T_{GW} - T)}{T_{GD} - T}} \quad (16)$$

در معادله (16)، E_0 مدول الاستیسیته در حالت مرجع، T_{GW} دمای انتقال شیشه‌ای در حالت مرطوب، T_{GD} دمای انتقال شیشه‌ای در حالت خشک و T نشان‌دهنده دما می‌باشد. به علاوه، دمای شیشه‌ای در حالت مرطوب به غلظت رطوبت بستگی دارد. از این‌رو:

$$T_{GW} = (0.005M_m^2 - 0.1M_m + 1)T_{GD} \quad (17)$$

که M_m رطوبت جذب شده توسط کامپوزیت می‌باشد. با استفاده از روابط بیان شده، می‌توان تأثیر تغییرات دما و رطوبت در تغییر خواص مکانیکی را تعیین و در نتیجه در مدل‌سازی خواص چندلایه استفاده کرد.

تعیین پاسخ دقیق مسئله

از آن‌جا که در ابتدا فرض شد که تمام لبه‌های ورق دارای تکیه‌گاه

با در نظر گرفتن این نکته که چنانچه زاویه الیاف متعامد در نظر گرفته شود و همچنین تقارن هندسی و مادی در راستای ضخامت وجود داشته باشد، مؤلفه‌های ماتریس $[B]$ صفر شده و وابستگی بین مؤلفه‌های نیروهای منتهجه و ممان‌های منتهجه حذف شده در نتیجه معادلات (۳-۱) و (۳-۲) از معادله (۳-۳) مستقل شده و این امکان فراهم می‌شود تا با حل معادله (۳-۳)، به بررسی خیز و تنش‌های ایجاد شده در ورق چندلایه پرداخته شود. بنابراین، معادله (۳-۳) پس از ساده‌سازی عبارت است از:

$$\begin{aligned} D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + (2D_{12} + 4D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \\ = q(x, y) \end{aligned} \quad (13)$$

معادله (۱۳)، معادله حاکم بر ورق چندلایه نازک با فرضیات زاویه الیاف متعامد و همچنین تقارن مادی و هندسی در راستای ضخامت می‌باشد.

تغییر خواص ماده در محیط گرم و مرطوب

در محیط‌های کاری بسیاری از اجزای سازه‌های هواپیماها، سفینه‌های فضایی، شناورهای دریایی و... شرایط رطوبتی-حرارتی را تجربه می‌کند [13]. رطوبت جذب شده و تغییرات دمای ایجاد شده باعث تغییر خواص ماده (Material degradation) شده که منجر به کاهش استحکام و سفتی سازه می‌شود که در عملکرد سازه تأثیر می‌گذارد. از این‌رو مطالعات مختلفی برای بررسی اثر شرایط حرارت و رطوبت روی پاسخ سازه‌ها انجام شده‌است [5].

وقتی که یک صفحه کامپوزیتی در معرض تماس با محیط مرطوب قرار می‌گیرد رطوبت با سرعت معینی در داخل لایه‌ها نفوذ کرده و سبب افزایش وزن آن می‌شود. افزایش وزن تا زمان اشباع کامل صفحه ادامه دارد. سرعت نفوذ رطوبت به ضریب نفوذ رطوبت وابسته است و این ضریب خود تابعی از دما بوده [14,15] ولی حساسیتی به تغییر درصد رطوبت ندارد [16,17].

چامیس در تحقیقی به بررسی تغییر خواص مواد پلیمری و همچنین تغییر خواص تک‌لایه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف پرداخت [5]. در این تحقیق ضمن مطالعه روابط میکرو مکانیکی حاکم بر تأثیر پارامترهای مختلف در تعیین ثوابت لازم حاکم بر

به منظور بررسی نتایج عددی، فرض شده است که ورق چندلایه از اپوکسی به همراه الیاف گرافیت ساخته شده است. از این رو خواص مواد به کار رفته عبارتند از [5]:

جدول ۱ خواص مواد تشکیل دهنده کامپوزیت

1744kg/m ³	دانسیته	الیاف
0.21GPa	مدول طولی	
0.014GPa	مدول عرضی	
0.014GPa	مدول برشی	
0.41	ضریب پواسون	ماتریس
1273kg/m ³	دانسیته	
0.0034GPa	مدول الاستیسیته	
0.44	ضریب پواسون	

در ادامه به بحث و بررسی نتایج عددی مختلف پرداخته شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که با حفظ کلیت تحقیق و به منظور عمومی سازی نتایج، نتایج عددی به صورت بی بعد ارائه شده است. از این رو خیز بی بعد ورق عبارت است از:

$$\bar{W} = \frac{WE_{f11}}{P_0 b} \quad (20)$$

در جداول (۲) تا (۴) مقادیر عددی و بی بعد خیز بیشینه ورق چندلایه تحت بار یک نواخت نشان داده شده است. در هر جدول، لایه چینی های متفاوتی در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر خیز بی بعد برای دماهای مختلف، رطوبت نسبی مختلف، کسر حجمی مختلف الیاف، کسر حجمی متفاوت حفره و نهایتاً ابعاد مختلف جدول بندی شده است. نتایج عددی نشان می دهد که افزایش دما یا افزایش رطوبت نسبی به طور چشم گیری خیز بی بعد ورق چندلایه را افزایش می دهد که این نشان از کاهش سفتی معادل ورق چندلایه دارد.

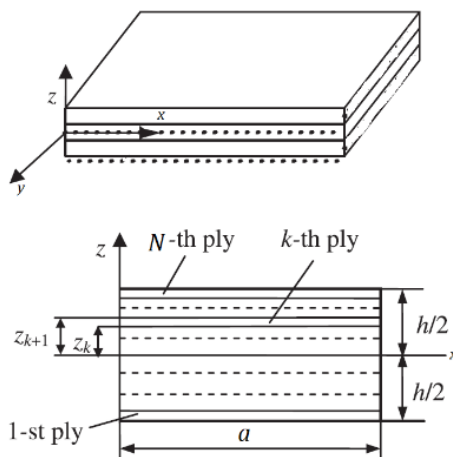
ساده می باشد، لذا از حل ناویر (Navier solution) که شامل حل سری های دوگانه سینوسی می باشد استفاده شده است. طبق این روش، به راحتی می توان نشان داد که ترکیب دوگانه توابع سینوسی به صورت زیر معادله تعادل و همچنین شرایط مرزی را ارضا می کند.

$$w(x, y) = \sum_{m=1} \sum_{n=1} W_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (18)$$

لازم به ذکر است که به منظور استفاده از حل ناویر، به سبب دوگانه سینوسی بار گسترده نیز استفاده می شود. حل معادله (۱۳) با کمک حل ناویر برای ورق نشان داده شده در شکل (۳) در حالتی که ورق تحت بار گسترده یک نواخت قرار دارد، به پاسخ دقیق زیر برای خیز ورق چندلایه منجر می شود:

$$W_{mn} = \frac{4P_0 \left(-1 + \cos\left(\frac{m\pi}{a}\right)\right) \left(-1 + \cos\left(\frac{n\pi}{b}\right)\right)}{ab \left(\frac{m\pi}{a}\right) \left(\frac{n\pi}{b}\right) \left(D_{11} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^4 + \dots\right.}$$

$$\left. \dots \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 (2D_{12} + 4D_{66}) + D_{22} \left(\frac{n\pi}{b}\right)^4 \right) \quad (19)$$



شکل ۳ شماتیک ورق چندلایه با طول و عرض a و b

نتایج عددی

در ابتدا لازم به ذکر است که به منظور اعتبارسنجی روابط ارائه شده، معادلات استخراج شده در قسمت های قبل با روابط ارائه شده در مراجع [12] و [5] هم خوانی دارد.

جدول ۲ خیز بی بعد ورق برای ورق کامپوزیتی تک جهته

$\frac{a}{b}$	$V_f\%$	$V_v\%$	$(T, RHR\%)$						
			(0,0)	(50,10)	(50,30)	(50,70)	(100,10)	(100,30)	(100,70)
0.5	30	0	4632.1	4700.7	4724.1	4768.8	4774.4	4804.8	4867.5
		5	4655.0	4721.6	4745.0	4789.9	4792.8	4823.5	4886.6
	70	0	2077.8	2090.2	2091.8	2095.2	2104.7	2107.2	2112.3
		5	2083.8	2095.3	2097.0	2100.8	2109.7	2111.9	2117
1	30	0	59717	61963	62749	64313	64512	65622	67991
		5	60093	62329	63146	64759	64860	66009	68472
	70	0	27842	28341	28416	28567	28980	29092	29318
		5	27952	28445	28523	28683	29082	29191	29428

جدول ۳ خیز بی بعد ورق برای ورق کامپوزیتی سه لایه با لایه چینی (0,90,0)

$\frac{a}{b}$	$V_f\%$	$V_v\%$	$(T, RHR\%)$						
			(0,0)	(50,10)	(50,30)	(50,70)	(100,10)	(100,30)	(100,70)
0.5	30	0	176.84	179.53	180.45	182.25	182.46	183.68	186.19
		5	177.69	180.33	181.27	183.06	183.16	184.39	186.92
	70	0	79.412	79.896	79.967	80.113	80.490	80.586	80.792
		5	79.640	80.098	80.170	80.323	80.674	80.774	80.977
1	30	0	2211.8	2294.7	2324.0	2381.9	2389.4	2430.1	2518.4
		5	2225.6	2308.5	2338.8	2398.6	2402.2	2444.7	2536.0
	70	0	1031.1	1049.6	1052.5	1058.1	1073.4	1077.3	1085.9
		5	1035.3	1053.5	1056.3	1062.4	1077.0	1081.3	1090.0

می باشد. هم چنین افزایش رطوبت نسبی نیز باعث کاهش خواص مکانیکی می گردد.

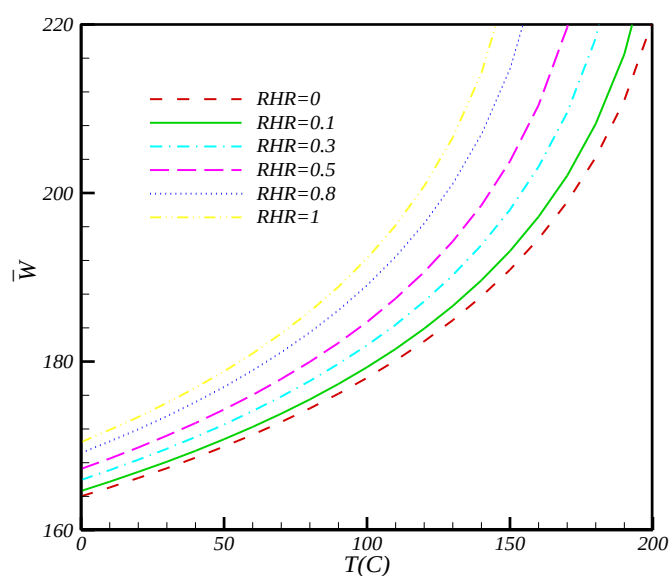
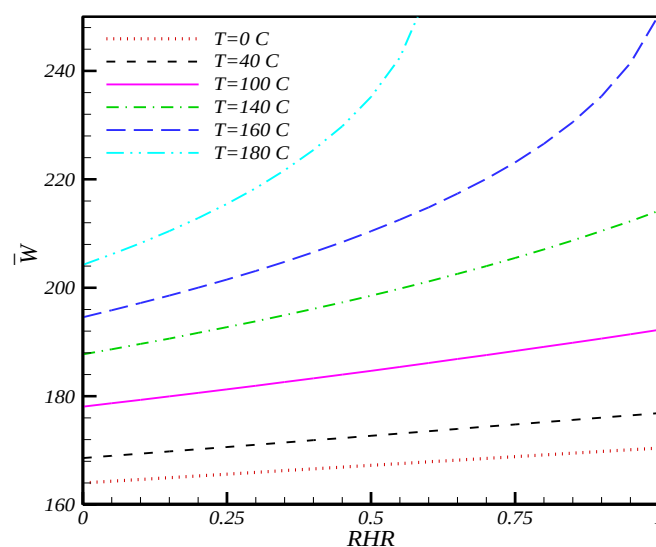
تغییرات خیز بی بعد بر حسب تغییرات رطوبت نسبی در شکل (۵) نشان داده شده است. نتایج برای ورق مستطیلی با نسبت طول به عرض ۰/۵ دارای چهار لایه با لایه چینی (۹۰/۰/۹۰) تعیین شده است. بر اساس نمودار نشان داده شده، با افزایش رطوبت نسبی، خیز بی بعد نیز افزایش پیدا می کند. به علاوه می توان نتیجه گرفت که تأثیر افزایش دما بیشتر از تأثیر افزایش رطوبت نسبی در تغییر خواص و در نتیجه تغییر رفتار ورق چندلایه می باشد. به طوری که در دماهای بالاتر، افزایش رطوبت نسبی تغییرات بیشتری در خیز بی بعد ایجاد می کند.

به علاوه، افزایش کسر حجمی حفره نیز باعث کاهش سفتی معادل چندلایه می شود و در نتیجه خیز بی بعد ورق افزایش پیدا می کند. هم چنین افزایش کسر حجمی الیاف باعث افزایش سفتی ورق چندلایه می شود و خیز بی بعد کاهش می یابد. مقایسه نتایج جداول (۳) و (۴) نشان می دهد که لایه چینی های مختلف باعث تغییر چشم گیری در نتایج می شود. به طوری که لایه چینی (۰/۹۰/۰) مقاومت در برابر خمش بیشتری نسبت به لایه چینی (۹۰/۰/۹۰) نشان می دهد.

در شکل (۴)، به بررسی اثر افزایش دما بر خیز بدون بعد ورق چندلایه در رطوبت های نسبی مختلف پرداخته شده است. نتایج این نمودار نشان می دهد که افزایش دما باعث تغییرات محسوس در رفتار ورق چندلایه می شود و با افزایش دما نرخ تغییر خیز بی بعد نیز به طور محسوسی افزایش می یابد. این موضوع به دلیل تغییر زیاد خواص مکانیکی تحت تأثیر دما

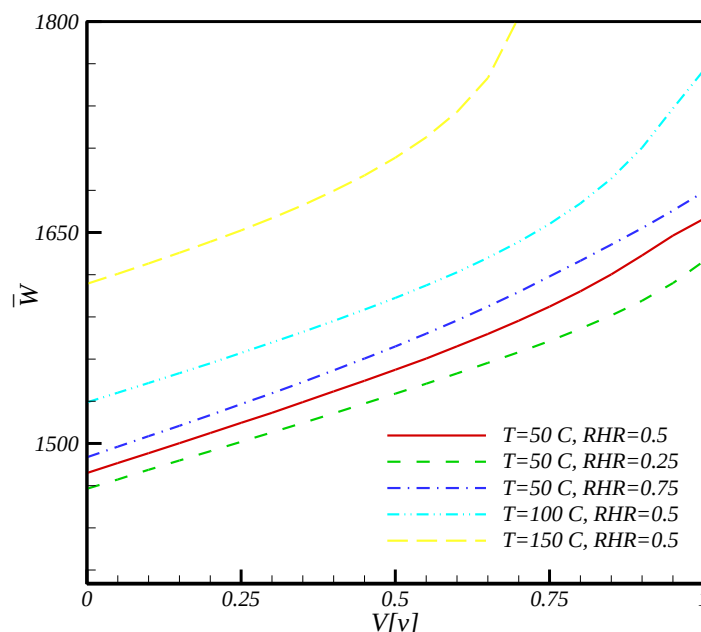
جدول ۴ خیز بی‌بعد ورق برای ورق کامپوزیتی سه‌لایه با لایه چینی (90,0,90)

$\frac{a}{b}$	$V_f\%$	$V_v\%$	(T, RHR%)						
			(0,0)	(50,10)	(50,30)	(50,70)	(100,10)	(100,30)	(100,70)
0.5	30	0	752.66	814.99	838.35	887.33	893.87	931.13	1018.0
		5	757.35	820.33	844.91	896.27	899.55	938.82	1030.9
	70	0	392.53	408.48	411.01	416.16	430.57	434.51	442.91
		5	394.35	410.33	412.96	418.37	432.45	436.58	445.36
1	30	0	2211.8	2294.7	2324.0	2381.9	2389.4	2430.1	2518.4
		5	2225.6	2308.5	2338.8	2398.6	2402.2	2444.7	2536.0
	70	0	1031.1	1049.6	1052.5	1058.1	1073.4	1077.3	1085.9
		5	1035.3	1053.5	1056.3	1062.4	1077.0	1081.3	1090.0

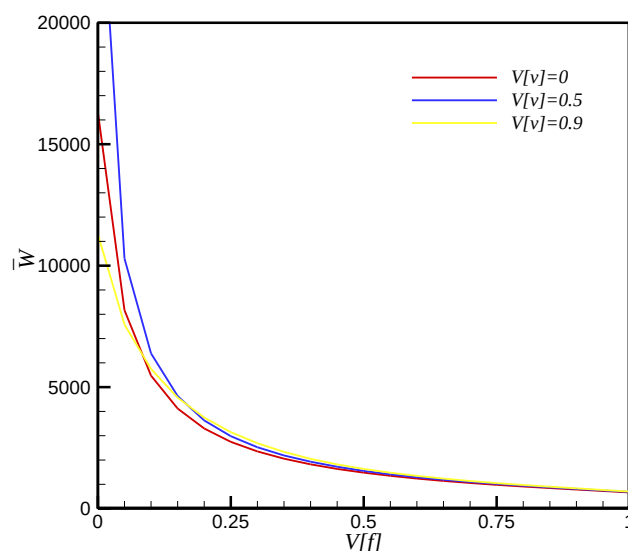
شکل ۴ تغییرات خیز بی‌بعد نسبت به تغییر دما و رطوبت نسبی برای ورق چهار لایه (90,0,0,90) مستطیلی ($a/b = 0.5$)شکل ۵ تغییرات خیز بی‌بعد نسبت به تغییر رطوبت نسبی برای ورق چهار لایه (90,0,0,90) مستطیلی ($\frac{a}{b} = 0.5$)

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۷)، افزایش کسر حجمی الیاف باعث افزایش مقاومت به خمش می گردد؛ اما در این افزایش حتماً باید ملاحظات اقتصادی را نیز در نظر گرفت چرا که بعد از محدوده مشخصی تغییر در کسر حجمی الیاف تغییر محسوسی در نتایج ایجاد نمی کند.

در نمودارهای (۶) و (۷)، تأثیر کسر حجمی حفره و الیاف روی خیز بی بعد ورق چندلایه مربعی نشان داده شده است. بر اساس شکل (۴)، افزایش میزان حفره درون ماتریس چندلایه کامپوزیتی باعث کاهش مقاومت در برابر خمش چندلایه می شود و در نتیجه خیز بی بعد آن افزایش پیدا می کند.



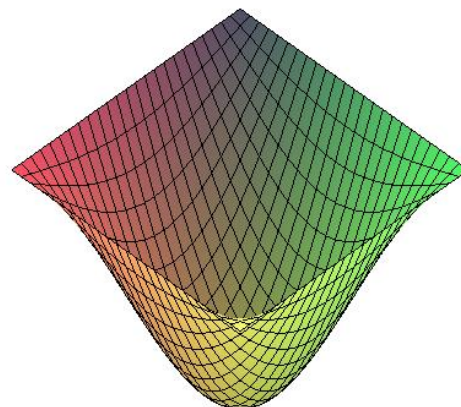
شکل ۶ تغییرات خیز بی بعد نسبت به تغییر کسر حجمی حفره برای ورق سه لایه (0,90,0) مربعی



شکل ۷ تغییرات خیز بی بعد نسبت به تغییر کسر حجمی الیاف برای ورق سه لایه (0,90,0) مربعی

تبادل، از روش حل ناویر استفاده گردید. همچنین، از مطالعات تجربی موجود در منابع، به جهت بررسی تغییر خواص مکانیکی چندلایه مورد تحلیل استفاده شد. نتایج عددی نشان می‌دهد که افزایش دما و رطوبت به‌طور محسوس مقاومت در برابر خمش ورق چندلایه را کاهش می‌دهد. همچنین اثر تغییر دما در مقایسه با تغییر رطوبت محسوس‌تر بوده است.

به‌علاوه، افزایش کسر حجمی حفره منجر به کاهش سفتی معادل ورق چندلایه می‌گردد. همچنین ملاحظه گردید که لایه‌چینی در تغییر سفتی معادل سازه تأثیر دارد.



شکل ۸ وضعیت تغییر شکل ورق چندلایه پس از اعمال بار گسترده یک‌نواخت

در شکل (۸)، وضعیت تغییر شکل یافته ورق چندلایه تحت بار گسترده یک‌نواخت نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش به بررسی تغییر خواص چندلایه‌های کامپوزیتی در محیط‌های گرم و مرطوب و اثر آن بر تغییر رفتار خمشی ورق چندلایه پرداخته شد. تئوری کلاسیک ورق برای استخراج معادلات تعادل ورق استفاده گردید و به‌منظور حل دقیق معادله

واژه نامه

Laminate	چندلایه
Composite	کامپوزیت
Material degradation	تغییر خواص ماده
Hygrothermal environment	محیط گرم و مرطوب
Bending	خمش
Relative Humidity	رطوبت نسبی
Mechanical properties	خواص مکانیکی
Layup	لایه چینی

مراجع

1. Mallick, P. K., "Fiber reinforced Composites, Materials, Design and Manufacturing", CR press, Book review (2007).
2. Devine, F. E., "Polyester Moulding Materials in Automotive Underbonnet Environments", *Composites*, Vol. 14, No: 4, pp. 353-358, (1983).
3. Belaid, S., Chabira, S. F., Balland, P., Sebba M., and Belhouideg S., "Thermal Aging Effect on the Mechanical Properties of Polyester Fiberglass Composites", *Journal of Materials and Environmental Science*, Vol. 6, No: 10, pp. 2795-2803, (2015).
4. Gopalan, R., Somashekar B.R., and Dattaguru B., "Environmental Effects on Fiber Polymer Composites", *Degradation and Stability*, Vol. 24, No: 4, pp. 361-371, (1989).
5. Chamis, C. C., "Simplified Composite mMicromechanics Equations for Hygral, Thermal and Mechanical Properties", NASA technical memorandum, in: *Ann. Confernce of the Society of the Plastics Industry (SPI) Reinforced Plastics/Composites Inst.* Hoston, USA (1983).
6. Gillat, O., and Broutman, L. J., "Effect of an External Stress on Moisture Diffusion and Degradation in a Graphite-

- reinforced Epoxy Laminate”, in: *Symposium on Advanced Composite Materials—Environmental Effects, ASTM STP*, pp. 658, USA (1977).
7. Laura Svetlik S., "An Investigation in the Hygrothermal Degradation of an E- Glass/Vinyl-Ester Composite in Humid and Immersion Environments", Ph.D. Thesis. Structural EngineeringUC San Diego, (2008).
8. Bittner T., Tej P., Bouska P., Vokac M., "Degradation of Laminated Glass as Result of Increased Temperature", *Advanced Materials Research*, Vol. 923, No: 2 , pp. 209-212, (2014).
9. Zamani, M.H. and Heidari-Ranani M. "Analytical Progressive Damage Analysis of Laminated Composites Based on Various Material Degradation Models", *The 6th International Conference on Composites Characterization, Fabrication and Application*, Iran, (2018).
10. Bouazza, M., and Zenkour, A. M., "Hygrothermal Environmental Effect on Free Vibration of Laminated Plates Using nth-order Shear Deformation Theory", *Waves in Random and Complex Media*, Inpress, (2021).
11. Singh, S. K., Chakrabarti A., "Hygrothermal Analysis of Laminated Composites Using C0 FE Model Based on Higher Order Zigzag Theory", *Steel and Composite Structures*, Vol. 23, No: 1, pp. 41-51, (2017).
12. Jones, R., "Mechanics Of Composite Materials", CRC Press, (1998).
13. Zenkour, A. M., Allam, M. N. M., and Radwan, A. F., "Effects of Hygrothermal Conditions on Cross-ply Laminated Plates Resting on Elastic Foundations", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 14, No: 1, pp. 144–159, (2014).
14. Shen, C. H., and Springer, G. S., "Moisture Absorbtion and Desorbtion of Composite Materials", *Journal Composite Materials*, Vol. 10, No: 1, pp. 2-20, (1967).
15. Springer, G. S., "Environmental Effects on Epoxy Matrix Composites”, in: *Procceding of Fifth Conference on Composite Materials, Testing and Design*, pp 291-312, (1979).
16. Allerd, R. E., and Lindrose, A., "The Room Temperature Moisture Kinetics of Kevlar 49 Fabric/Epoxy Laminates", in: *Procceding of Fifth Conference on Composite Materials, Testing and Design*, pp. 313-323, (1979).
17. Augl, J. M., and Trabocco, R., "Environmental Degradation Studies on Carbon Fiber Reinforced Epoxies", Presented at the “Workshop on Durability of Composite Materials, the Battelle Memorial Institue, Ohio, (1975).

Calculating the Added Mass Matrix of an Airship Using Boundary Element Method*

Research Article

Ali Jafarian¹ Mohammadreza Alavi Tabatabaei²
Saeed Shakhesi³

1. Introduction

Airships are controllable systems and can perform various maneuvers in longitudinal and lateral directions. For this reason, it is used in various works such as monitoring, telecommunication, environmental, as well as advertising and entertainment applications.

Due to the movement of the airship, the guidance and control of this system in different directions is very important and in simulating the flight mechanics, all forces on the airship should be considered. When the motion of a system in a fluid is accelerated, it will support additional forces besides the drag force. These forces are considered equivalent to the mass and moment of inertia added to the body.

One of the most suitable methods for determining the added mass of an airship is the boundary element method. In the boundary element method, the simulation is performed by solving the ideal flow and arranging the elements at the boundary. In classical CFD such as finite element or finite volume methods, the number of computational meshes is greatly increased because the entire solution area is meshed, but in the boundary element method only the surface of the object is meshed and the number of computational meshes decreases dramatically.

In this study, the boundary element code is prepared in Fortran language and the geometry of the body is divided into triangular panels at the surface by using Gambit software. The computational network file will be added to the code as input. At first, to validate the computational code, the added mass matrix for the sphere and two ellipses with different aspect ratios are simulated. The calculation code is then used to calculate the added mass matrix of the two airships.

2. Added mass

The added mass of an object will be important in cases where the density of the object is in the order of the density of the fluid around the object. For example, in the movement of airships and marine engineering, these forces must be calculated. Therefore, the amount of added mass in aircrafts, missiles, drones, and other similar systems is not calculated. On the other hand, in systems such as airships, submarines and torpedoes, the added mass must be calculated and taken into account in dynamic simulations.

In general, when a force is applied to an object in a certain direction, the direction of motion and also the acceleration of the object is not limited to the direction of

the force. Therefore, the acceleration of the body will be in three directions, and in addition, it will be also subjected to three angular accelerations. As a result, the added mass matrix will be an $M_{6 \times 6}$ matrix that shows the effect of each motion on forces and moments.

3. Results

In general, an airship has various components such as hull, tail, and gondola. By examining different airships, it can be seen that the two profiles NPL and GNVR are common profiles that have been used in the design of the airship hull. In this study, both geometries have been used to simulate an airship. The geometry of NPL consists of two ovals with the same small diameter and different large diameters, and the ratio of large diameter to the small diameter of the body is 3.85. Instead, the GNVR geometry profile consists of three different curves. An oval is used at the tip of the body, a circular profile is used in the middle part and the end part is parabolic where the ratio of large diameter to small diameter is equal to 3.05.

Simulation of boundary element airship

In this step, the simulation of the boundary element for the airship with the tail assembly and gondola is performed and the added mass matrix coefficients are extracted. Figure 1 shows the computational network created to simulate an airship with two profiles. Here, the hull volume of the two airships is the same. As shown in this figure, finer elements are used for the wings and the gondola.

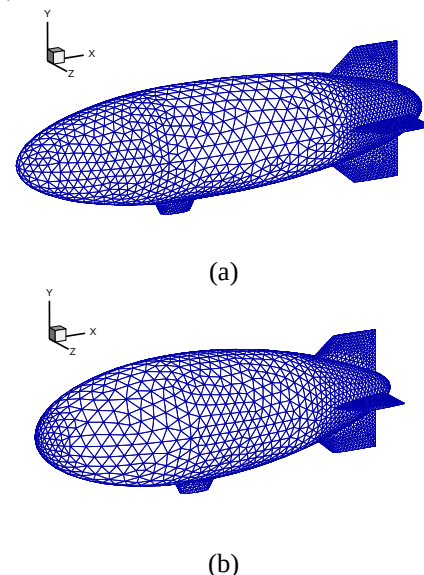


Figure 1. Triangular meshes created on an airship (a) NPL geometry (b) GNVR geometry

Table 1 shows the results for the values of the added mass matrix elements with NPL and GNVR profiles. In general, when the hull is without a wing, the airship does not resist rolling and the value of the A_{44} element is zero.

* Manuscript received: 06 July 2021; Revised, 26 February 2022, Accepted, 27 July 2022.

¹. Corresponding author. PhD, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran. **Email:** a.jafarian@isrc.ac.ir.

². Master of Science, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran.

³. Associated Professor, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran.

Here the value of the A_{44} element will not be zero and the value of the two non-diagonal elements A_{35} and A_{26} will be significant. Other non-diagonal elements will be almost zero.

Table 1. Dimensionless coefficients of added mass matrix for airship with NPL and GNVR hull profiles

Added Mass Element	Airship with GNVR geometry	Airship with NPL geometry
A_{11}	0.01003	0.00426
A_{22}	0.07885	0.05563
A_{33}	0.07975	0.05699
A_{44}	0.000065	0.000053
A_{55}	0.003043	0.00257
A_{66}	0.00303	0.00249
A_{26}	-0.00042	0.00130
A_{35}	0.00047	-0.0015

Figure 2 presents a comparison between some added matrix elements for airship with two profiles, NPL and GNVR. As it can be seen, the values of the elements for the GNVR profile are larger than the corresponding values in the NPL profile. Moreover, for a more accurate comparison of the differences between the two geometries, the percentage difference of the added matrix elements between the two profiles is presented in Table 2. The differences are greater for the A_{11} element and the non-diameter elements A_{26} and A_{35} than for other elements, and the A_{66} and A_{55} elements are the least different.

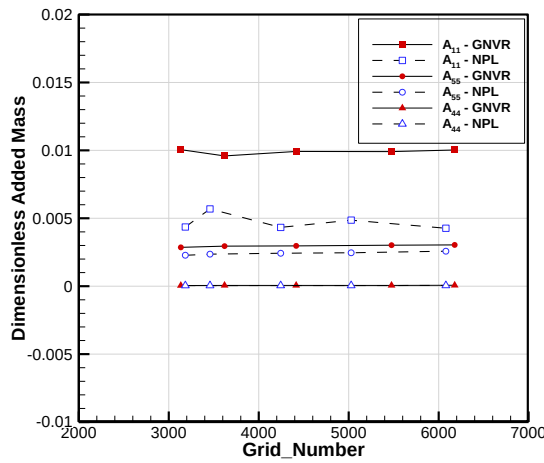


Figure 2. Comparison of results A_{11} , A_{44} , A_{55} between two airships with NPL and GNVR hulls for different computing networks

Table 2. Percentage difference of results for added mass values for two different NPL and GNVR hulls

Added Mass Element	$\frac{ A_{ij,NPL} - A_{ij,GNVR} }{ A_{ij,NPL} } \times 100$
A_{11}	135.1
A_{22}	28.9
A_{33}	39.9
A_{44}	22.4
A_{55}	18.1
A_{66}	21.4
A_{26}	132.4
A_{35}	130.8

4. Conclusion

In this study, the boundary element method was used to determine the added mass of the airship. For this purpose, computational code was developed with the above method using Fortran language. The required computational network is created in a triangular shape on the surface of the object using Gambit software and is given as input to the code. First, to validate the computational code, the added mass matrix is simulated for usual geometries such as spheres and ellipses. The values obtained for spheres and ellipses are compared with the results of the analytical solution for the potential flow and the results are in good agreement with the analytical solution. The difference is less than 3% compared to the analytical solution.

The calculation code is then used for two airships with two profiles, NPL and GNVR. The above two profiles are modeled alone and with the tail assembly and gondola and the results of the added mass matrix elements are presented in the dimensionless form for each case. In the case of the hull alone, the coefficient A_{44} is zero, and by adding the wings, this element has a value that indicates the resistance of the wings to the movement of the airship's roll. Moreover, unlike elliptical geometry, where the non-diagonal coefficients are zero, in this case, due to the asymmetry to the yz plane, they will not be zero, and these values are also calculated for the airship. According to the results, all added mass elements of the airship with the GNVR hull are more than the NPL hull.

Since the boundary element method uses only the computational network at the body surface, the number of computational elements drastically reduced and as a result, the computational speed is much higher than the classical CFD methods. In addition, in the present method, by solving the potential flow, all coefficients of the added mass matrix are calculated at high speed, and the possibility of geometric optimization in the shape and dimensions of the control surfaces of the airship is provided.

تعیین ماتریس جرم افزوده کشتی هوایی با استفاده از روش المان مرزی*

علی جعفریان^(۱)محمد رضا علوی طباطبایی^(۲)سعید شاخصی^(۳)

چکیده در مقاله حاضر ماتریس جرم افزوده کشتی هوایی با استفاده از روش المان مرزی تعیین شده است. گسسته سازی معادلات حاکم بر روی شبکه مثلثی بر روی سطح جسم انجام شده است. شبکه محاسباتی بر روی سطح جسم با استفاده از نرم افزار گمبیت ایجاد شده و به صورت ورودی در کد المان مرزی نوشته شده به زبان فرترن به کار گرفته شده است. ابتدا به منظور صحت سنجی کد المان مرزی، ماتریس جرم افزوده برای هندسه های متداول مانند کره و بیضی گون با نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک ۲ و ۳/۸۵ انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی المان مرزی کاملاً با مقادیر به دست آمده از حل تحلیلی تطابق دارند. سپس ماتریس جرم افزوده برای بدنه کشتی هوایی با دو پروفیل NPL و GNVR که از پرکاربردترین پروفیل ها در بدنه کشتی های هوایی است محاسبه شده است. در نهایت هندسه کامل کشتی هوایی به همراه مجموعه دم و سبد، با استفاده از دو پروفیل مختلف بدنه شبکه بندی شده است و ماتریس جرم افزوده برای کشتی هوایی در دو حالت به دست آمده است.

واژه های کلیدی کشتی هوایی، روش المان مرزی، جرم افزوده.

مقدمه

کشتی های هوایی جزو سامانه های پرنده هستند که در دهه ۱۹۳۰ میلادی به دنیا عرضه شدند. در نمونه های اولیه، نیروی برآ به وسیله گاز هیدروژن تأمین می شده است. به دلیل قابلیت بالای اشتعال هیدروژن و سوانح هوایی در دهه های گذشته، استفاده از این سامانه ها برای مدت ها از دستور کار توسعه دهندگان کشتی های هوایی خارج شد. در دو دهه اخیر به علت استفاده از هلیوم به جای هیدروژن و افزایش تکنولوژی در ساخت پوشش های پارچه ای با استحکام بالا و وزن کم، مجدداً سامانه های باد شونده مورد توجه دانشمندان علوم هوا و فضا قرار گرفته است [1].

کشتی هوایی یک سامانه هدایت پذیر است و قابلیت انجام مانورهای مختلف در جهت طولی و عرضی را دارا است. به همین دلیل در مأموریت های مختلف به صورت کاربردهای پایشی، مخابراتی، زیست محیطی و نیز کاربردهای تبلیغاتی و تفریحی مورد استفاده قرار می گیرد. به منظور مطالعه دقیق تر روند تکامل کشتی های هوایی طی سال های مختلف می توان به مراجع [1,2]

مراجعة نمود.

با توجه به حرکت کشتی هوایی، هدایت و کنترل این سامانه در مسیرهای مختلف بسیار حائز اهمیت است و در شبیه سازی مکانیک پرواز باید تمامی نیروهای وارد به کشتی هوایی مد نظر قرار گیرد. زمانی که حرکت یک جسم در داخل سیال، یک حرکت شتاب دار باشد در این صورت جسم علاوه بر نیروی درگ متحمل نیروهای اضافی نیز خواهد شد. این نیروها به صورت معادل جرم و ممان اینرسی افزوده شده به جسم در نظر گرفته می شود.

با توجه به آن که طراحی کشتی های هوایی به صورت تجربی دارای هزینه های بسیار بالایی است، استفاده از شبیه سازی برای دستیابی به طراحی بهینه و نیز مدل سازی به منظور اعمال تغییرات و بهینه کردن پارامترهای طراحی امری ضروری است. روش های مختلف شبیه سازی عددی وجود دارد که می توان از این روش ها برای مدل سازی جریان در کشتی هوایی استفاده کرد. به منظور ساده سازی و استفاده از روش های سرعت بالا می توان فرض وجود جریان ایده آل را مطرح کرد و از این فرض برای

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۴/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۴/۵ می باشد.

(۱) نویسنده مسئول، دکتری، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران

(۲) کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران

(۳) دانشیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران

بسیاری از مدل‌سازی‌های دینامیکی کشتی‌های هوایی، از روش بیضی‌گونِ معادل برای شبیه‌سازی مکانیک پرواز استفاده شده‌است. به عنوان مثال گومز و همکاران در سال ۲۰۰۹ یک کشتی هوایی با نام YEZ-2 طراحی کرده‌اند و با استفاده از مقدار جرم افزوده‌ای که از بیضی‌گونِ معادل به‌دست آورده‌اند شبیه‌سازی‌های کنترلی را انجام داده‌اند [10,11]. هم‌چنین لی و همکاران در شبیه‌سازی مکانیک پرواز خود از ضرایب استخراج شده برای بیضی‌گون برای جرم افزوده کشتی هوایی مورد نظر خود استفاده کرده‌اند [12]. مولر و همکاران نیز با استفاده از روشی که لمب [13] برای تعیین جرم افزوده بیضی‌گون معرفی کرده‌است برای محاسبه ماتریس جرم افزوده کشتی هوایی استفاده کرده‌اند [14].

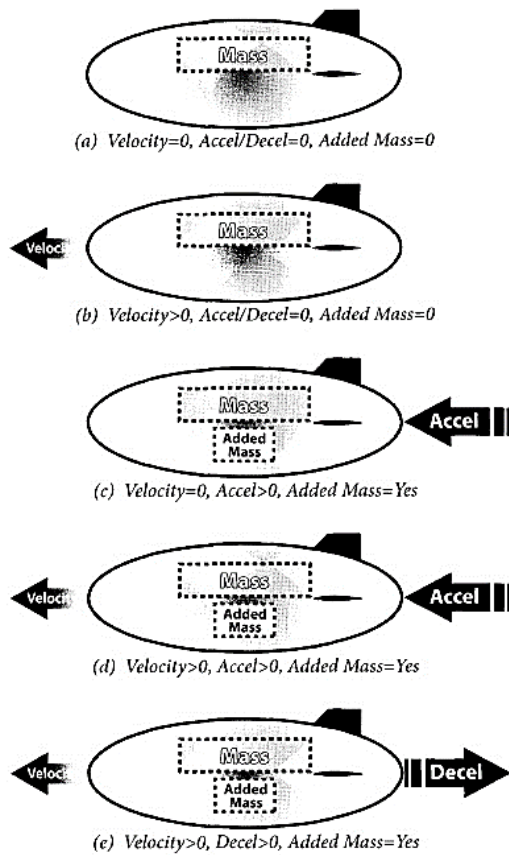
اما به‌منظور تعیین دقیق‌تر ماتریس جرم افزوده برای سامانه‌های کشتی هوایی، شبیه‌سازی‌های مختلفی با استفاده از روش‌های مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده‌است. به عنوان مثال، آروز و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از مدل‌سازی جریان سیال پتانسیل ماتریس جرم افزوده کشتی هوایی با شکل غیرممتعارف را محاسبه نمودند [15]. تاوری و همکاران در سال ۲۰۱۳ جرم افزوده یک کشتی هوایی بدون سرنشین و با شکل هیبرید با سه لوب مختلف را محاسبه نمود [16] وی در کار دیگری در سال ۲۰۱۴ با استفاده از حل عددی جریان پتانسیل ماتریس جرم افزوده سامانه‌های مختلف کشتی هوایی با شکل‌های مختلف را محاسبه نمودند [17].

در روش‌های کلاسیک دینامیک سیالات محاسباتی مانند روش‌های المان محدود و یا حجم محدود به علت آن‌که کل ناحیه حل شبکه‌بندی می‌شود، تعداد سلول‌های محاسباتی بسیار افزایش می‌یابد، اما در روش المان مرزی تنها سطح جسم شبکه‌بندی می‌شود و تعداد سلول‌های محاسباتی به طرز چشم‌گیری کاهش می‌یابد. با مرور بر مقالاتی که از روش‌های کلاسیک برای تعیین ماتریس جرم افزوده استفاده کرده‌اند ملاحظه می‌شود که به علت هزینه بالای محاسباتی روش‌های کلاسیک، معمولاً تعداد محدودی از درایه‌های ماتریس جرم افزوده تعیین می‌شوند، اما با استفاده از روش المان مرزی مقدار تمامی درایه‌ها تعیین خواهند شد.

شبیه‌سازی استفاده نمود. البته این فرض خطاهایی را نیز در شبیه‌سازی دخیل خواهد نمود اما به‌طور چشم‌گیری سبب افزایش سرعت شبیه‌سازی خواهد شد. یکی از روش‌هایی که از فرض وجود جریان ایده آل برای شبیه‌سازی استفاده می‌کند روش المان مرزی است. در روش المان مرزی، شبیه‌سازی با استفاده از حل جریان ایده آل و چیده‌شدن المان‌ها در مرز انجام می‌شود و میزان خطایی که در محاسبه جرم افزوده به‌وجود خواهد آمد قابل قبول خواهد بود. از طرف دیگر در روند طراحی معمولاً هندسه بدنه و متعلقات و نیز جانمایی اجزای مختلف تغییر می‌کند. لذا استفاده از روش‌های پیچیده محاسباتی برای تعیین ضرایب جرم افزوده و نیروهای وارده بر کشتی‌های هوایی بسیار پرهزینه و زمان‌بر خواهد بود و استفاده از روش‌های پرهزینه محاسباتی روند طراحی را با اختلال همراه خواهد کرد. روش المان مرزی روشی سریع و پرکاربرد در تعیین این نیروها است و در بسیاری از طراحی‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌است [3]. به عنوان مثال در سال ۱۹۸۱ او و بریا از روش المان مرزی برای پیش‌بینی ایجاد موج در جریان پتانسیل سطح آزاد پرداختند [4]. در سال ۲۰۰۰ جویی و همکاران از این روش برای محاسبه نیروهای امواج که بر شناورهای سطحی با هندسه‌های مختلف ایجاد می‌شود استفاده کردند [5] و در سال ۲۰۰۵ ژو و همکاران اثر جریان‌های کم عمق را بر روی جرم افزوده استوانه با سطح مقطع‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند [6]. هم‌چنین لین و لیائو در سال ۲۰۱۱ مقادیر ماتریس جرم افزوده زیردریایی را با استفاده از روش المان مرزی محاسبه نمودند [7]. قاسمی و یاری نیز در سال ۲۰۱۱ از روش المان مرزی برای محاسبه ماتریس جرم افزوده پروانه دوار و هیدروفویل استفاده نمودند [8]. هم‌چنین میرزایی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۷ از روش المان مرزی برای محاسبه جرم افزوده زیردریایی سابوف استفاده کردند و ضرایب قطری و غیرقطری ماتریس جرم افزوده را محاسبه نمودند [9].

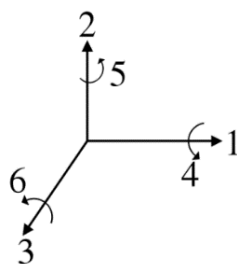
از طرف دیگر در برخی از مراجع، به‌منظور ساده‌سازی و تخمین سریع ضرایب، هندسه بدنه کشتی هوایی به‌صورت یک بیضی‌گون با حجم معادل در نظر گرفته می‌شود. از آن‌جا که حل تحلیلی جریان پتانسیل برای بیضی‌گون وجود دارد، می‌توان جرم افزوده کشتی‌های هوایی را با بیضی‌گون معادل تقریب زد. در

می‌دهد. شکل (۲) شماره اختصاص یافته به هر یک از جهات اصلی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ حالت‌های مختلف پروازی که در آن مقدار جرم افزوده حائز

اهمیت است [۱۸]



شکل ۲ جهات اصلی

معادلات حاکم

در پژوهش حاضر در شبیه‌سازی جریان سیال از جملات لزجت صرف‌نظر شده است و جریان ایده‌آل به همراه معادله‌ی لاپلاس سه‌بعدی برای بیان رفتار جریان سیال در نظر گرفته شده است.

در مقاله حاضر ماتریس جرم افزوده اجسام مختلف و کشتی هوایی محاسبه شده است. بدین منظور کد المان مرزی به زبان فرترن تهیه شده است و هندسه جسم با استفاده از نرم‌افزار گمبیت به پانل‌های مثلثی در سطح تقسیم‌بندی خواهد شد و فایل شبکه محاسباتی به عنوان ورودی به کد اضافه خواهد شد. در این مقاله ابتدا تئوری جرم افزوده ارائه خواهد شد. سپس به منظور صحنه‌سنجی، شبیه‌سازی بر روی هندسه کره و بیضی‌گون با نسبت منطقی مختلف انجام شده است و پس از آن هندسه بدنه کشتی هوایی با دو پروفیل بدنه متداول مدل‌سازی شده است. در نهایت بدنه کامل کشتی هوایی که شامل سبد و بالک‌ها است، شبیه‌سازی شده و ماتریس جرم افزوده برای این دو حالت به دست آمده است.

جرم افزوده

جرم افزوده یک جسم، در مسائلی که در آن چگالی جسم هم‌مرتبه با چگالی سیال اطراف جسم است حائز اهمیت خواهد بود. به عنوان مثال در مسائل مربوط به حرکت کشتی‌های هوایی و مهندسی دریا این نیروها باید محاسبه شود. از این رو مقدار جرم افزوده در هواپیماها، موشک‌ها، پهپادها و سایر سامانه‌های مشابه محاسبه نمی‌شود. از طرف دیگر در سامانه‌هایی نظیر زیردریایی‌ها، اژدرها باید جرم افزوده را محاسبه کرد و اثر آن را در شبیه‌سازی‌های دینامیکی لحاظ نمود.

ماتریس جرم افزوده در شبیه‌سازی‌های مکانیک پرواز وارد می‌شود و در صحت شبیه‌سازی‌ها اثر بسزایی خواهد داشت. مطابق اطلاعات ارائه شده در مرجع [11]، در نظر نگرفتن ماتریس جرم افزوده سبب خطای ۱۰۰ درصدی در شبیه‌سازی دینامیکی می‌شود. شکل (۱) حالت‌های مختلف پرواز که در آن مقدار جرم افزوده مهم است را نشان می‌دهد [18].

در حالت کلی زمانی که به یک جسم در یک جهت خاص نیرو وارد می‌شود جهت حرکت و نیز جهت شتاب‌گرفتن جسم فقط به جهت نیرو محدود نمی‌شود. بنابراین شتاب‌گیری جسم در سه جهت که جهات اصلی (۱، ۲، ۳) عمود بر هم می‌باشد خواهد بود و علاوه بر آن سه شتاب زاویه‌ای (۴، ۵، ۶) نیز کسب می‌نماید. در نتیجه ماتریس جرم افزوده یک ماتریس 6×6 خواهد بود که اثر هر یک از حرکت‌ها بر روی نیروها و ممان‌ها را نشان

که Γ نشان دهنده مرز یا بخشی از مرز است، n_q و u_p بردار یکه نرمال بر Γ در نقطه q و p است. $\zeta(q)$ تابع دلخواه در نقطه q است و $G_k(p, q)$ تابع گرین است که این تابع برای حالت سه بعدی و حل معادله لاپلاس عبارت است از $G_k(p, q) = 1/4\pi r$. در گام بعد باید مقادیر انتگرالی به صورت گسسته بیان شود. در این جا داریم که سطح مرز $S = \sum_{j=1}^n \Delta S_j$ از پانل های مختلفی تشکیل شده است و n تعداد پانل ها است و مقدار جمع مساحت پانل های مختلف برابر با کل سطح مرز جسم است. با ثابت فرض کردن مقدار کمیت ها بر روی سطح یک پانل و با جایگذاری در داخل انتگرال های معادلات حاکم، فرم گسسته معادلات حاکم به دست خواهد آمد.

$$\sum_{j=1}^n \left\{ \left(M + \frac{1}{2} I \right) e \right\} \Delta S_j(p_i) \phi_j \approx \sum_{j=1}^n \{ L e \} \Delta S_j(p_i) v_j \quad (8)$$

که e تابع یکه است. با تعیین فرم گسسته برای معادلات حاکم دستگاه معادلات به صورت زیر به دست می آید:

$$\left(M + \frac{1}{2} I \right) \phi \approx L v \quad (9)$$

که $[L]_{ij} = [Le]_{\Delta S_j(p_i)} [M]_{ij} = [Me]_{\Delta S_j(p_i)}$ و ϕ, v بردارهای مقادیر دقیق توابع بر روی مرکز المان می باشد. در ضمن با توجه به رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$\{L_k \zeta\}_{\Gamma}(p) \approx \sum_{j=1}^n \left[\zeta(p_j) \{L_k e\}_{\Delta \Gamma_j}(p) \right] \quad (10)$$

سایر انتگرال ها نیز مشابه انتگرال فوق گسسته شده و در کد محاسباتی اعمال می شود [9].

صحنه سنجی روش عددی

در این قسمت کد المان مرزی صحنه سنجی شده است. بدین منظور از هندسه های متداول مانند کره و بیضی گون که نتایج حل تحلیلی برای آنها موجود است استفاده شده است. هم چنین بیضی گون با دو نسبت قطر بزرگ به کوچک مختلف برای شبیه سازی استفاده شده است که در ادامه شبیه سازی و نتایج هر یک از این مسائل ارائه شده است.

جرم افزوده کره

یک کره با شعاع ۱ متر با استفاده از نرم افزار گمبیت شبکه بندی شده است و مرکز این کره بر روی مبدأ مختصات قرار دارد. در

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

که ϕ تابع پتانسیل جریان است و مشتق نرمال نیز به صورت زیر تعریف می شود.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial \phi}{\partial x} n_x + \frac{\partial \phi}{\partial y} n_y + \frac{\partial \phi}{\partial z} n_z \quad (2)$$

و $[n_x, n_y, n_z]$ بردار نرمال عمود بر سطح و به سمت خارج از مرز می باشد. با جایگزینی معادله حاکم با معادله انتگرالی حاصل از قضیه گرین خواهیم داشت:

$$\int_s \frac{\partial G}{\partial n_q}(p, q) \phi(q) dS_q + \frac{1}{2} \phi(q) = \int_s G(p, q) \frac{\partial \phi}{\partial n_q} dS_q \quad (3)$$

که G تابع گرین است. به لحاظ فیزیکی تابع G نشان دهنده یک تابع چشمه است که در نقطه q وجود دارد و در نقطه p اثر آن بررسی می شود.

حل عددی معادلات انتگرالی

برای حل عددی معادلات حاکم، معادلات انتگرالی باید به دستگاه معادلات جبری تبدیل شود. بنابراین دستگاه معادلات جبری به صورت $\left(M + \frac{1}{2} I \right) \phi = L v$ به دست خواهد آمد. که ϕ و v بیانگر $\phi(p)$ و $\frac{\partial \phi(p)}{\partial n_q}$ است و M, L و I نشان دهنده ماتریس های حل عددی است. در این جا به منظور تبدیل معادلات انتگرالی به معادلات جبری از روش نقطه ای استفاده شده است که در این روش سطح جسم به وسیله المان های مختلف تقسیم بندی می شود و مقدار هر کمیت در مرکز المان در نظر گرفته شده و این مقدار در کل المان ثابت است. هم چنین به منظور بیان روابط از بیان اپراتوری استفاده شده است که در حالت کلی عبارت است از [9]:

$$\{L_k \zeta\}_{\Gamma}(p) = \int_{\Gamma} G_k(p, q) \zeta(q) dS_q \quad (4)$$

$$\{M_k \zeta\}_{\Gamma}(p) = \int_{\Gamma} \frac{\partial G_k(p, q)}{\partial n_q} \zeta(q) dS_q \quad (5)$$

$$\{M_k^t \zeta\}_{\Gamma}(p) = \frac{\partial}{\partial u_p} \int_{\Gamma} G_k(p, q) \zeta(q) dS_q \quad (6)$$

$$\{N_k \zeta\}_{\Gamma}(p) = \frac{\partial}{\partial u_p} \int_{\Gamma} \frac{\partial G_k(p, q)}{\partial n_q} \zeta(q) dS_q \quad (7)$$

جدول ۱ مقدار ضرایب M_{11}, M_{22}, M_{33} برای کره در شبکه‌های مختلف

تعداد المان			
۲۶۵۰	۱۱۹۰	۶۱۰	
۲/۰۲۲	۱/۷۶۳	۱/۶۹۷	BEM
۲/۰۹۰	۲/۰۹۰	۲/۰۹۰	تحلیلی
۳/۲	۱۵/۶	۱۸/۸	% خطا
۲/۰۷۶	۱/۷۷۳	۱/۶۹۵	BEM
۲/۰۹۰	۲/۰۹۰	۲/۰۹۰	تحلیلی
۰/۶	۱۵/۱	۱۸/۹	% خطا
۲/۰۷۶	۱/۷۷۳	۱/۶۹۵	BEM
۲/۰۹۰	۲/۰۹۰	۲/۰۹۰	تحلیلی
۰/۶	۱۵/۱	۱۸/۹	% خطا

جرم افزوده بیضی‌گون

یکی دیگر از هندسه‌هایی که ماتریس جرم افزوده برای آن به صورت تحلیلی به دست می‌آید بیضی‌گون است. در این جا نیز فرض جریان پتانسیل برای حل تحلیلی برقرار است و دو بیضی‌گون با دو نسبت منطری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت اول نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک $a/b=2$ بوده و حالت دوم برابر با $a/b=3/85$ است. علت استفاده از بیضی‌گون با نسبت منطری $3/85$ ، یکسان شدن نسبت منطری آن با کشتی هوایی با بدنه NPL است. هندسه‌های این دو بیضی‌گون با استفاده از نرم افزار گمبیت شبکه بندی شده است و نتایج تحلیلی برای ضرایب‌های مختلف قطری جرم افزوده به صورت بدون بعد برای بیضی‌گون در شکل (۴) ارائه شده است.

در بیضی‌گون به علت تقارن، ضرایب غیر قطری و مقدار المان M_{44} صفر است. همچنین نتایج تحلیلی نشان می‌دهد که ضرایب $M_{22}=M_{33}$ و $M_{55}=M_{66}$ است. به منظور بی بعد سازی، ضرایب M_{11}, M_{22}, M_{33} از مقدار $4\pi ab^2/3$ استفاده می‌شود و ضرایب M_{55}, M_{66} با مقدار $4\pi ab^2(a^2 + b^2)/15$ بی بعد خواهند شد. در نتیجه خواهیم داشت:

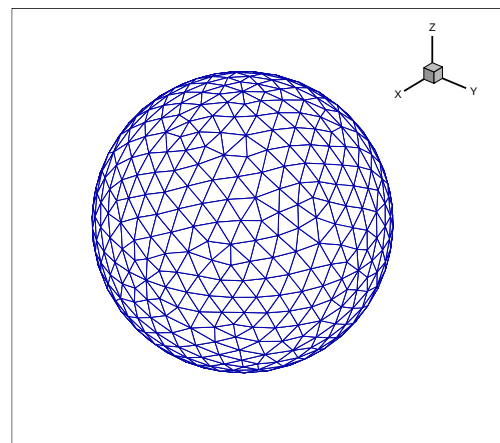
$$\begin{aligned} M_{11} &= A_{11} \times \frac{4\pi}{3} ab^2 \\ M_{22} &= M_{33} = A_{22} \times \frac{4\pi}{3} ab^2 \\ M_{55} &= M_{66} = A_{55} \times \frac{4\pi}{15} ab^2 (a^2 + b^2) \end{aligned} \quad (12)$$

شبیه سازی حاضر، از سه شبکه درشت، متوسط و ریز استفاده شده است و تعداد المان‌ها به ترتیب ۶۱۰، ۱۱۹۰ و ۲۶۵۰ المان مثلثی است. شکل (۳) توزیع المان‌های مثلثی بر روی سطح کره را نشان می‌دهد.

در حل تحلیلی جریان حول کره، از اثرات ویسکوزیته سیال صرف نظر شده و جریان به صورت جریان پتانسیل در نظر گرفته می‌شود. همچنین حرکت کره به صورت خطی در نظر گرفته شده و به علت تقارن هندسی کره در سه صفحه اصلی، سه المان اول قطر اصلی ماتریس جرم افزوده دارای مقدار است و سایر المان‌های ماتریس صفر می‌باشد. با استفاده از حل تحلیلی جریان پتانسیل حول کره خواهیم داشت [19]:

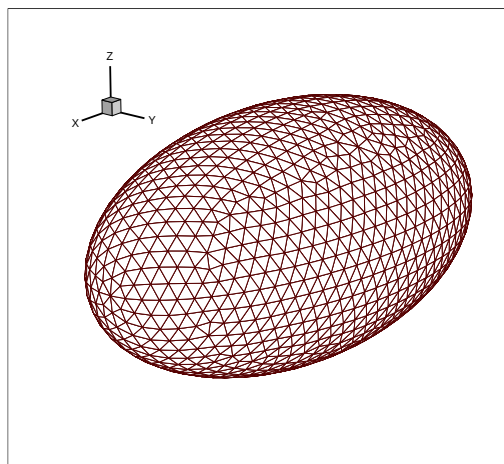
$$M_{ii(i=1,3)} = \frac{2}{3} \pi a^3 \quad (11)$$

که a برابر با شعاع کره است.

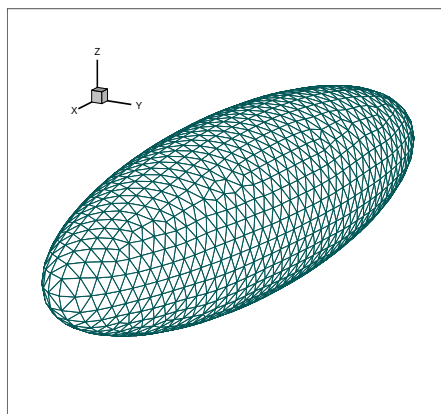


شکل ۳ شبکه بندی کره با المان‌های مثلثی

نتایج مربوط به المان‌های قطری ماتریس جرم افزوده در شبیه سازی بر روی سه شبکه مختلف در جدول (۱) ارائه شده است. همان طور که مشخص است با افزایش تعداد المان‌ها خطای شبیه سازی به شدت کاهش یافته است و به مقادیر تحلیلی کاملاً نزدیک شده است. در این حالت بیشینه خطا در شبکه ریز مربوط به المان M_{11} است و حدود ۳٪ است و مقدار خطا در المان‌های M_{22} و M_{33} حدود ۰/۶٪ است که نشان دهنده قابلیت روش استفاده شده در محاسبه جرم افزوده کره است.



شکل ۵ شبکه‌های محاسباتی مختلف برای بیضی گون با نسبت $b/2a$



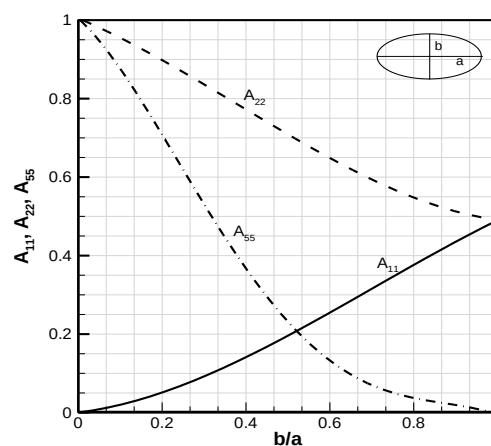
شکل ۶ شبکه‌های محاسباتی مختلف برای بیضی گون با نسبت $b/3a/85$

جدول ۲ مقدار ضرایب بدون بعد $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{55}, A_{11}, A_{22}$ برای بیضی گون با نسبت $b/2a$ در شبکه‌های مختلف

تعداد المان					
۳۳۹۶	۲۶۲۸	۱۹۲۸		A ₁₁	
۰/۱۹۰	۰/۱۸۳	۰/۱۷۷	BEM		
۰/۱۹۶	۰/۱۹۶	۰/۱۹۶	تحلیلی		
۳/۲	۶/۸	۹/۵	خطا %	A ₂₂ =A ₃₃	
۰/۶۹۳	۰/۶۶۸	۰/۶۴۶	BEM		
۰/۷۰۹	۰/۷۰۹	۰/۷۰۹	تحلیلی		
۲/۳	۵/۸	۸/۹	خطا %	A ₅₅ =A ₁₁	
۰/۲۳۱	۰/۲۲۵	۰/۲۲۰	BEM		
۰/۲۳۲	۰/۲۳۲	۰/۲۳۲	تحلیلی		
۰/۲	۲/۹	۵/۰	خطا %		

شکل (۶) شبکه محاسباتی ایجاد شده بر روی سطح بیضی گون با نسبت منظری $a/b=3/85$ را نشان می‌دهد. در این جا

در فرمول فوق a, b شعاع کوچک و بزرگ بیضی گون هستند و ضرایب A_{11}, A_{22}, A_{55} در شکل (۴) به صورت بی‌بعد برای نسبت قطرهای مختلف ارائه شده‌است و بدین ترتیب حالات مختلف را می‌توان با استفاده از این نمودار تقریب زد [13].

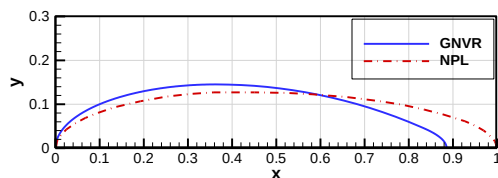


شکل ۴ نمودار ضرایب جرم افزوده برای بیضی گون با نسبت قطر بزرگ و کوچک مختلف

جرم افزوده بیضی گون با نسبت $a/b=2$ در این بخش، ماتریس جرم افزوده بیضی گون با نسبت شعاع بزرگ به کوچک $a/b=2$ محاسبه شده‌است. اجزای مختلف بر روی شبکه‌های درشت، متوسط و ریز انجام شده‌است. شکل ۵ شبکه‌بندی مثلثی ایجاد شده در سطح بیضی گون را نشان می‌دهد. تعداد المان‌های مثلثی به کار گرفته شده در شبکه‌های مختلف به ترتیب، ۲۶۲۸، ۱۹۲۸ و ۳۳۹۶ عدد است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تحلیلی حاصل از رابطه (۱۲)، در جدول (۲) مقایسه شده‌است. همان‌طور که مشخص است با افزایش تعداد المان‌ها، مقدار خطای شبیه‌سازی نسبت به حل تحلیلی بسیار کاهش یافته‌است و در حالت استفاده از شبکه ریز مقدار خطای بیشینه برابر با ۳/۲٪ است.

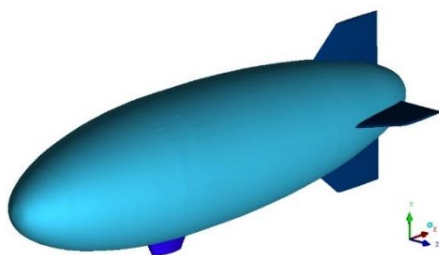
جرم افزوده بیضی گون با نسبت $a/b=3/85$ در این بخش نیز مانند حالت قبل بیضی گون با نسبت شعاع بزرگ به کوچک $a/b=3/85$ شبیه‌سازی شده‌است. با توجه به آن‌که سامانه کشتی هوایی مورد نظر در بخش نتایج، دارای نسبت منظری $3/85$ است، نسبت منظری بیضی گون نیز همین مقدار انتخاب شده‌است.

هندسه برای شبیه‌سازی کشتی‌های استفاده شده‌است. هندسه NPL از دو بیضی با قطر کوچک یکسان و قطر بزرگ متفاوت تشکیل شده‌است [18] و در کار حاضر نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک بدنه برابر با ۳/۸۵ است. در عوض پروفیل هندسه GNVR از سه منحنی مختلف تشکیل شده‌است. در نوک بدنه از بیضی، در قسمت میانی از دایره و در قسمت انتهایی از پروفیل سهموی استفاده شده‌است [18] و نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک برابر با ۳/۰۵ است. شکل (۷) مقایسه دو پروفیل NPL و GNVR را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، با توجه به اهمیت به‌سزای نیروی شناوری در کشتی‌های هوایی و وابستگی این نیرو به حجم بدنه کشتی هوایی، ابعاد در دو هندسه طوری تعیین شده‌است که حجم حاصل از دوران دو منحنی یکسان گردد. دو پروفیل نشان داده شده در شکل (۷) نسبت به طول پروفیل NPL بی‌بعد شده‌است.



شکل ۷ مقایسه پروفیل بدنه برای دو هندسه GNVR و NPL

در کشتی‌های هوایی شبیه‌سازی شده، در انتهای بدنه نیز چهار دم به‌صورت علامت (+) در نظر گرفته شده‌است که برای کنترل و پایداری کشتی هوایی به‌کار گرفته می‌شود. همچنین یک سبد نیز در زیر بدنه کشتی هوایی برای قرارگیری اجزای مختلف مانند باتری‌ها، کامپیوتر پرواز، موتورهای و... قرار گرفته‌است. هر یک از این متعلقات به‌طور جداگانه بر روی هر دو هندسه بدنه سوار شده و مدل‌سازی برای هر دو هندسه مختلف انجام شده‌است. شکل (۸)، نمای کلی کشتی هوایی مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل ۸ نمای کلی هندسه کشتی هوایی

نیز شبیه‌سازی بر روی سه شبکه محاسباتی درشت، متوسط و ریز با تعداد المان‌های ۱۶۳۰، ۲۶۹۰ و ۳۴۳۰ انجام شده‌است. جدول (۳) مقایسه نتایج تحلیلی و المان مرزی برای ضرایب قطری ماتریس جرم افزوده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشخص است با افزایش تعداد المان‌ها مقدار خطای شبیه‌سازی المان مرزی نسبت به حل تحلیلی کاهش داشته‌است و بیشینه خطای محاسباتی در شبکه ۳۴۳۰ برابر با ۲/۹٪ است.

جدول ۳ مقدار ضرایب $A_{11}, A_{12}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$ برای بیضی‌گون با نسبت

$$b/a = 3/85 \text{ در شبکه‌های مختلف}$$

تعداد المان			
۳۴۳۰	۲۶۹۰	۱۶۳۰	
۰/۰۷۳۷	۰/۰۷۲۷	۰/۰۷۰۱	BEM
۰/۰۷۴۶	۰/۰۷۴۶	۰/۰۷۴۶	تحلیلی
۱/۲	۲/۵۸	۶/۰۴	خطا %
۰/۸۴۸	۰/۸۲۹	۰/۸۰۲	BEM
۰/۸۶۱۶	۰/۸۶۱۶	۰/۸۶۱۶	تحلیلی
۱/۶	۳/۸۰	۶/۹۳	خطا %
۰/۵۸۳	۰/۵۶۲	۰/۵۴۵	BEM
۰/۶۰۱۹	۰/۶۰۱۹	۰/۶۰۱۹	تحلیلی
۲/۹	۶/۷۰	۹/۴۴	خطا %

با توجه به نتایج ارائه شده در این بخش ملاحظه شد که روش المان مرزی و کد محاسباتی توسعه داده شده قابلیت محاسبه جرم افزوده اجسام بیضی شکل با دقت بسیار بالا و مقدار خطای کمتر از ۳٪ نسبت به حل تحلیلی را داراست. با توجه به آن‌که هندسه کشتی‌های هوایی به بیضی‌گون شباهت زیادی دارد، روش حاضر برای محاسبه ماتریس جرم افزوده کشتی هوایی مورد استفاده قرار خواهد گرفت که در بخش بعد به آن پرداخته شده‌است.

نتایج

پس از صحه‌سنجی کد محاسباتی، شبیه‌سازی المان مرزی برای کشتی هوایی انجام شده‌است. به‌طور کلی، کشتی هوایی دارای اجزای مختلفی مانند بدنه، مجموعه دم و سبد است. با بررسی کشتی‌های هوایی مختلف مشاهده می‌شود که دو پروفیل NPL و GNVR پروفیل‌های متداولی هستند که در طراحی بدنه کشتی هوایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در پروژه حاضر از هر دو

افزوده را برای دو پروفیل NPL و GNVR نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که L_{ref} برای هر کدام از پروفیل‌ها مطابق با طول همان پروفیل در نظر گرفته شده‌است.

همان‌طور که در جدول زیر مشخص است، مقدار A_{44} برای هر دو پروفیل صفر به دست آمده و این مسئله با فیزیک حاکم بر مسئله کاملاً سازگار است. در واقع به علت عدم وجود بالک‌ها، مقاومت جریان نسبت به حرکت رول بسیار کم می‌شود و مقدار این المان صفر به دست می‌آید. این امر مشابه بیضی‌گون است و در مورد بیضی‌گون نیز مقدار المان A_{44} نیز به لحاظ تحلیلی صفر محاسبه به دست می‌آید. هم‌چنین با توجه به تقارن مسئله در صفحات xz و xy ، مقادیر المان‌های A_{22} و A_{33} با هم برابر است. این امر در مورد المان‌های A_{55} و A_{66} نیز برقرار است.

جدول ۴ مقادیر جرم افزوده برای بدنه NPL و GNVR

بدنه GNVR	بدنه NPL	درایه ماتریس
۰/۰۱۰۰۹	۰/۰۰۴۵۰	A_{11}
۰/۰۷۳۱۱	۰/۰۵۰۶۶	A_{22}
۰/۰۷۲۸۶	۰/۰۵۰۶۷	A_{33}
۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	A_{44}
۰/۰۰۲۴۱	۰/۰۰۱۸۷	A_{55}
۰/۰۰۲۴۲	۰/۰۰۱۸۸	A_{66}
۰/۰۰۳۱۷	۰/۰۰۰۲۴	A_{21}
-۰/۰۰۳۲۳	-۰/۰۰۰۲۴	A_{35}

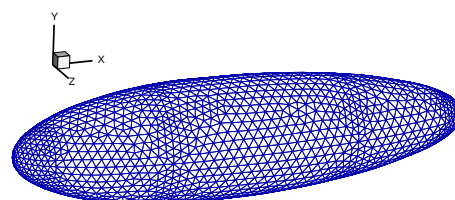
بر خلاف بیضی‌گون در بدنه کشتی هوایی به علت عدم تقارن نسبت به صفحه yz ، المان‌های غیر قطری مقدار پیدا می‌کنند. مقادیر غیر قطری ماتریس جرم افزوده برای هر دو پروفیل در جدول (۴) ارائه شده‌است. در بدنه کشتی هوایی المان‌های A_{26} و A_{35} غیر صفر هستند و سایر المان‌های غیر قطری تقریباً صفر می‌باشند.

شبیه‌سازی المان مرزی کشتی هوایی با متعلقات دم و سبد

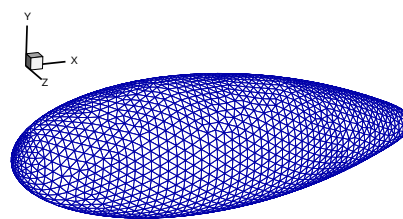
در گام بعد، شبیه‌سازی المان مرزی برای کشتی هوایی به همراه متعلقات مجموعه دم و سبد انجام و ضرایب ماتریس جرم افزوده استخراج شده‌است. شکل (۱۰) شبکه محاسباتی ایجاد شده برای

شبیه‌سازی المان مرزی بدنه کشتی هوایی

در این بخش، هندسه بدنه، بدون متعلقات مجموعه دم و سبد شبیه‌سازی شده‌است. دو بدنه با استفاده از المان‌های مثلثی شبکه‌بندی شده‌است و در شکل (۹) شبکه محاسباتی ایجاد شده نشان داده شده‌است.



(الف)



(ب)

شکل ۹ شبکه‌بندی مثلثی ایجاد شده بر روی بدنه کشتی هوایی (الف)

هندسه NPL (ب) هندسه GNVR

مقادیر مربوط به المان‌های قطری و غیرقطری ماتریس جرم افزوده بدنه کشتی هوایی در جدول (۴) ارائه شده‌است. در این شبیه‌سازی ۴۳۶۲ المان برای پروفیل NPL و ۴۵۰۰ المان برای پروفیل GNVR در نظر گرفته شده‌است. المان‌های ماتریس جرم افزوده به صورت بدون بعد استخراج شده‌است و نحوه بی‌بعدسازی ضرایب به صورت زیر است.

$$A_{ij} = \frac{M_{ij}}{\frac{1}{2} \rho L_{ref}^3} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (13)$$

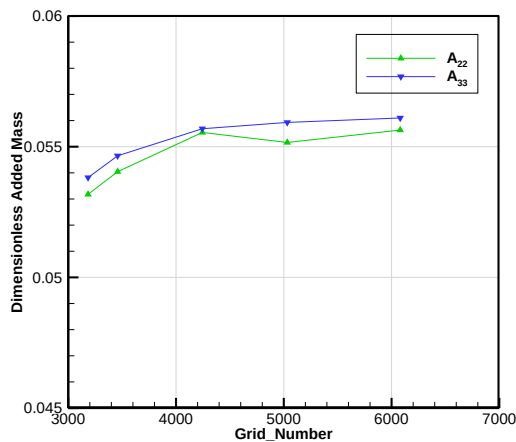
$$A_{ij} = \frac{M_{ij}}{\frac{1}{2} \rho L_{ref}^5} \quad (i = j = 4, 5, 6) \quad (14)$$

و برای سایر المان‌های ماتریس جرم افزوده:

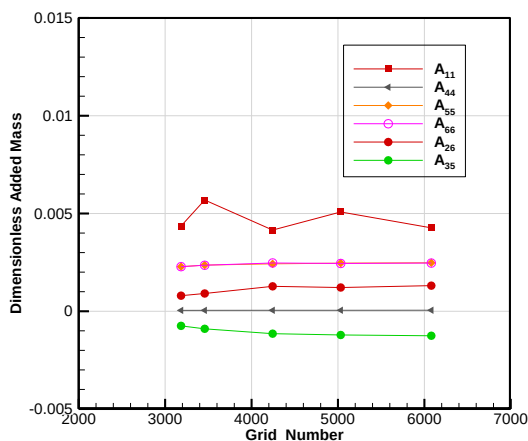
$$A_{ij} = \frac{M_{ij}}{\frac{1}{2} \rho L_{ref}^4} \quad (15)$$

که ρ بیانگر چگالی سیال و L_{ref} نشان‌دهنده طول مشخصه کشتی هوایی است که معمولاً برابر با طول کشتی هوایی در نظر گرفته می‌شود. جدول ۴ مقادیر بی‌بعد المان‌های ماتریس جرم

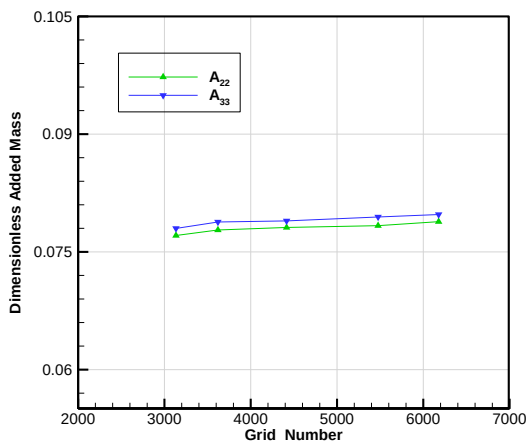
نیز با افزایش تعداد المان‌های محاسباتی، مقدار جرم افزوده تقریباً برای تمامی المان‌های ماتریس ثابت شده است.



شکل ۱۱ تغییرات المان‌های A_{22} و A_{33} در ماتریس جرم افزوده کشتی هوایی با پروفیل بدنه NPL

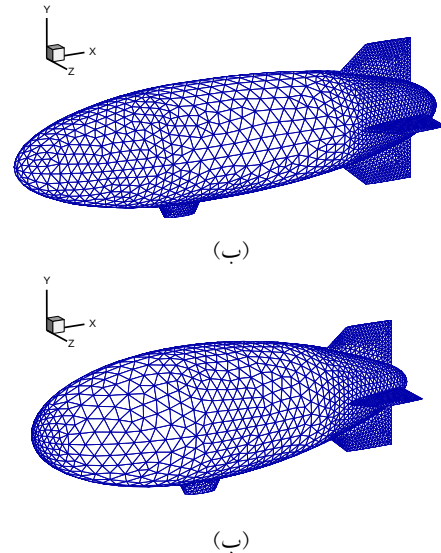


شکل ۱۲ تغییرات المان‌های A_{11} ، A_{44} ، A_{55} ، A_{66} ، A_{26} ، A_{35} در ماتریس جرم افزوده کشتی هوایی با پروفیل بدنه NPL



شکل ۱۳ تغییرات ضرایب جرم افزوده A_{22} ، A_{33} با تغییر تعداد المان در کشتی هوایی با پروفیل بدنه GNVR

شبیه‌سازی کشتی هوایی با دو پروفیل را نشان می‌دهد. در اینجا نیز حجم بدنه دو کشتی هوایی یکسان است. همان‌طور که در شکل مشخص است، در المان‌بندی بالک‌ها و سبد از المان‌های ریزتر استفاده شده است.



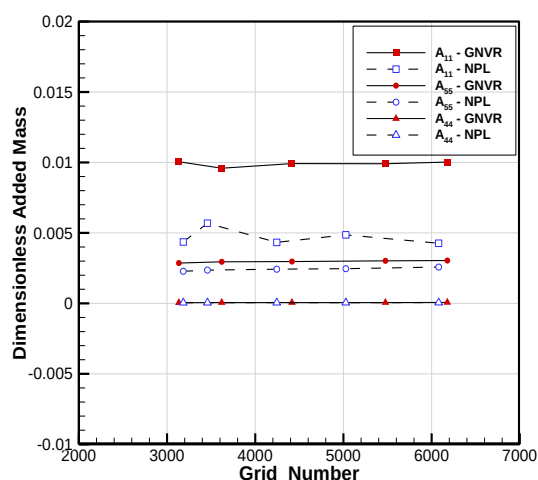
شکل ۱۰ شبکه‌بندی مثلثی ایجاد شده بر روی کشتی هوایی (الف) هندسه NPL (ب) هندسه GNVR

به‌منظور بررسی استقلال حل المان مرزی از شبکه محاسباتی، شبیه‌سازی بر روی پنج شبکه با تعداد المان‌های مختلف انجام شده است. تعداد المان‌های به‌کار گرفته شده در شبیه‌سازی با هندسه NPL عبارت‌است از ۳۱۸۴، ۳۵۴۸، ۴۲۴۴، ۵۰۳۲ و ۶۰۵۰. نتایج مربوط به تغییرات المان‌های ماتریس جرم افزوده با تغییر تعداد شبکه محاسباتی در پروفیل NPL در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش تعداد المان‌های محاسباتی مقادیر جرم افزوده تقریباً ثابت شده است که نشان‌دهنده استقلال حل از شبکه محاسباتی است. در این حالت مقادیر المان‌های A_{22} و A_{33} و نیز A_{55} و A_{66} به هم نزدیک است. اما به علت این‌که اثر وجود سبد کشتی هوایی در حرکت کشتی در جهت z بیشتر از جهت y است، مقدار المان A_{33} بزرگ‌تر از A_{22} به‌دست خواهد آمد.

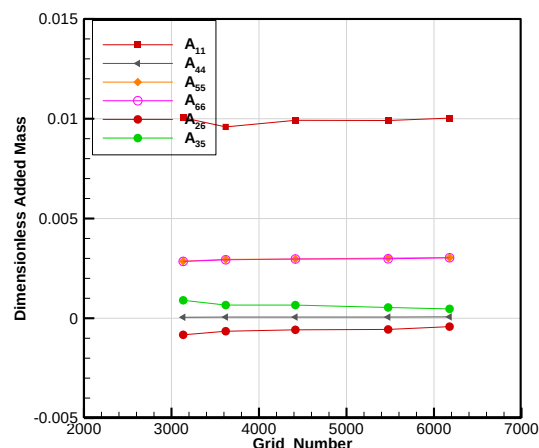
مشابه با هندسه NPL، در شبیه‌سازی کشتی هوایی با هندسه GNVR از ۳۱۳۴، ۳۶۲۰، ۴۴۱۶، ۵۴۷۶ و ۶۱۷۸ شبکه محاسباتی استفاده شده است و نمودار تغییرات ضرایب جرم افزوده با تغییر تعداد المان در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است. در این‌جا

شکل (۱۵) مقایسه بین برخی از المان‌های ماتریس جرم افزوده برای کشتی هوایی با دو پروفیل NPL و GNVR ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، مقادیر المان‌ها برای پروفیل GNVR بزرگ‌تر از مقادیر متناظر در پروفیل NPL است. همچنین برای مقایسه دقیق‌تر تفاوت دو هندسه، درصد اختلاف المان‌های ماتریس جرم افزوده بین دو پروفیل در جدول (۶) ارائه شده است. میزان اختلاف برای المان A_{11} و درایه‌ها غیر قطری A_{26} و A_{35} نسبت به سایر المان‌ها بیشتر است و درایه‌های A_{55} و A_{66} کمترین اختلاف را دارند. نکته مهمی که باید در ضرایب به دست آمده مد نظر قرار گیرد این است که هر کدام از ضرایب با توجه به طول بدنه خود بدون بعد شده‌اند و مقدار طولی که برای بدون بعدسازی استفاده شده است در هر دو پروفیل یکسان نیست.

البته لازم به ذکر است که هر دو هندسه بررسی شده در این پژوهش از هندسه‌های متداول در ساخت کشتی‌های هوایی هستند و مقدار ماتریس جرم افزوده به تنهایی شاخص مناسبی برای انتخاب بین دو هندسه فوق نیست. به منظور انتخاب صحیح بین هندسه‌های فوق باید نتایج فوق در شبیه‌سازی‌های دینامیکی وارد شوند و سپس مانورپذیری و کنترل‌پذیری به عنوان معیار برای انتخاب بین این دو پروفیل قرار گیرد.



شکل ۱۵ مقایسه نتایج A_{11} ، A_{26} ، A_{35} بین دو کشتی هوایی برای دو بدنه GNVR و NPL برای شبکه‌های محاسباتی مختلف



شکل ۱۴ تغییرات ضرایب جرم افزوده A_{11} ، A_{26} ، A_{35} ، A_{44} ، A_{55} ، A_{66} با تغییر تعداد المان در کشتی هوایی با پروفیل بدنه GNVR

مشابه با حالت قبل، در پروفیل GNVR، مقدار المان‌های A_{22} ، A_{33} و نیز A_{55} ، A_{66} بسیار به هم نزدیک است و تفاوت جزئی ایجاد شده در اثر وجود سبد ایجاد شده است.

جدول (۵) نتایج مربوط به مقادیر المان‌های ماتریس جرم افزوده با دو پروفیل NPL و GNVR را نشان می‌دهد. در این‌جا بر خلاف بدنه کشتی هوایی مقدار المان A_{44} صفر نخواهد بود. این امر به علت اضافه شدن بالک‌ها به بدنه و مقاومت جریان نسبت به حرکت رول کشتی هوایی ایجاد شده است. در این حالت نیز دو المان غیر قطری A_{26} و A_{35} حائز اهمیت خواهند شد و سایر المان‌های غیر قطری تقریباً صفر خواهد شد.

جدول ۵ ضرایب بدون بعد ماتریس جرم افزوده برای کشتی هوایی با پروفیل بدنه GNVR و NPL

کشتی با بدنه GNVR	کشتی با بدنه NPL	درایه ماتریس
۰/۰۱۰۰۳	۰/۰۰۴۲۶	A_{11}
۰/۰۷۸۸۵	۰/۰۵۵۶۳	A_{22}
۰/۰۷۹۷۵	۰/۰۵۶۹۹	A_{33}
۰/۰۰۰۰۶۵	۰/۰۰۰۰۵۳	A_{44}
۰/۰۳۰۴۳	۰/۰۰۲۵۷	A_{55}
۰/۰۰۳۰۳	۰/۰۰۲۴۹	A_{66}
-۰/۰۰۰۰۴۲	۰/۰۰۱۳۰	A_{26}
۰/۰۰۰۰۴۷	-۰/۰۰۱۵	A_{35}

جدول ۶ درصد تفاوت نتایج برای مقادیر جرم افزوده برای دو بدنه مختلف

GNVR و NPL

المان	$\frac{ A_{ij,NPL} - A_{ij,GNVR} }{ A_{ij,NPL} } \times 100$
A_{11}	۱۳۵/۱
A_{22}	۴۱/۷
A_{33}	۳۹/۹
A_{44}	۲۲/۴
A_{55}	۱۸/۱
A_{66}	۲۱/۴
A_{77}	۱۳۲/۴
A_{88}	۱۳۰/۸

GNVR بیشتر از بدنه NPL است. با توجه به آن که روش المان مرزی تنها از شبکه محاسباتی در سطح جسم استفاده می کند تعداد المان های محاسباتی به شدت کاهش یافته است و در نتیجه سرعت انجام محاسبات بسیار بالاتر از روش های کلاسیک CFD است. در ضمن در روش حاضر با حل جریان پتانسیل تمامی ضرایب ماتریس جرم افزوده با سرعت بالا محاسبه می شود و امکان بهینه سازی هندسی در شکل و ابعاد سطوح کنترلی در طراحی کشتی هوایی فراهم می شود.

فهرست علائم

المان بدون بعد ماتریس جرم افزوده	A_{ij}
شعاع بزرگ بیضی گون	a
شعاع کوچک بیضی گون	b
تابع گرین	G
طول مشخصه	L_{ref}
مقدار جرم افزوده	m_{added}
المان ماتریس جرم افزوده	M_{ij}
جهت نرمال بر سطح	n
مساحت	S
مشتق تابع پتانسیل	v
تابع پتانسیل جریان	Φ
تابع دل خواه	ζ

واژه نامه

Added Mass	جرم افزوده
Boundary Element Method	روش المان مرزی
Green Function	تابع گرین
Airship	کشتی هوایی
Aerostat	بالن هواپیست
Body Profile	پروفیل بدنه
Added Mass Matrix	ماتریس جرم افزوده

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر از روش المان مرزی به منظور تعیین جرم افزوده کشتی هوایی استفاده شده است. بدین منظور کد محاسباتی با زبان فرترن و روش فوق توسعه داده شده است. شبکه محاسباتی مورد نیاز به صورت مثلثی بر روی سطح جسم و با استفاده از نرم افزار گمبیت ایجاد شده و به صورت ورودی به کد داده شده است. ابتدا به منظور صحت سنجی کد محاسباتی، ماتریس جرم افزوده برای هندسه های متداول مانند کره و بیضی گون شبیه سازی شده است. مقادیر به دست آمده برای کره و بیضی گون با نتایج حل تحلیلی برای جریان پتانسیل مقایسه شده است و نتایج تطابق بسیار خوبی با حل تحلیلی دارد و مقدار خطا نسبت به حل تحلیلی کمتر از ۳٪ به دست آمده است. سپس کد محاسباتی برای دو کشتی هوایی با دو پروفیل NPL و GNVR استفاده شده است. دو پروفیل فوق به صورت تنها و نیز به همراه مجموعه دم و سبد مدل سازی شده است و نتایج المان های ماتریس جرم افزوده به صورت بدون بعد برای هر حالت ارائه شده است. در حالت بدنه تنها، ضریب A_{44} صفر به دست آمده است و با اضافه کردن بالکها این المان دارای مقدار شده است که نشان دهنده مقاومت بالکها نسبت به حرکت رول کشتی هوایی است. همچنین برخلاف هندسه بیضی گون که ضرایب غیر قطری صفر است، در این حالت به علت عدم تقارن نسبت به صفحه yz، صفر نخواهد بود و این مقادیر نیز برای کشتی هوایی محاسبه شده است. با توجه به نتایج، مشاهده شد که تمامی المان های جرم افزوده کشتی هوایی با بدنه

مراجع

1. Liao, L., and Pasternak, I., "A Review of Airship Structural Research and Development", *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 45, No. 4-5, Pp. 83-96, (2009).
2. Li, Y., Nahon, M., and Sharf, I., "Airship Dynamics Modeling: A Literature Review", *Progress in aerospace sciences*, Vol. 47, No. 3, Pp. 217-39, (2011).
3. Banerjee, P. K. and Butterfield, R., "Boundary Element Methods in Engineering Science", *McGraw-Hill London*, Vol. 17: (1981).
4. Au, M., and Brebbia, C., "Numerical Prediction of Wave Forces Using the Boundary Element Method", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 6, No. 4, Pp. 218-28, (1982).
5. Choi, Y. R., Hong, S. Y., and Choi, H. S., "An Analysis of Second-Order Wave Forces on Floating Bodies by Using a Higher-Order Boundary Element Method", *Ocean Engineering*, Vol. 28, No. 1, Pp. 117-38, (2001).
6. Zhou, Z., Lo, E. Y., and Tan, S., "Effect of Shallow and Narrow Water on Added Mass of Cylinders with Various Cross-Sectional Shapes", *Ocean engineering*, Vol. 32, No. 10, Pp. 1199-215, (2005).
7. Lin, Z., and Liao, S., "Calculation of Added Mass Coefficients of 3d Complicated Underwater Bodies by Fmbem", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 16, No. 1, Pp. 187-94, (2011).
8. Ghassemi, H., and Yari, E., "The Added Mass Coefficient Computation of Sphere, Ellipsoid and Marine Propellers Using Boundary Element Method", *Polish Maritime Research*, Vol. 18, No. 1, Pp. 17-26, (2011).
9. Mirzaei, D., Jafarian, A., Badri, M. A., and Zamani, M. R., "Evaluation of Added Mass for an Underwater Vehicle Using Boundary Element Method", *Tabriz Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 47, No. 3, Pp. 243-50, (2017).
10. Gomes, S. B. V., "An investigation into the flight dynamics of airships with application to the YEZ-2A", PhD diss., Cranfield University, (1990).
11. Gomes, S. B. V., and Ramos, J. G., "Airship Dynamic Modeling for Autonomous Operation", Paper presented at the Proceedings, 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146), (1998).
12. Li, Y., Nahon, M., and Sharf, I., "Dynamics Modeling and Simulation of Flexible Airships", *AIAA journal*, Vol. 47, No. 3, Pp. 592-605, (2009).
13. H. Lamb, "Hydrodynamics", Reprint of the 1932 sixth edition, Cambridge University Press, Cambridge, (1993)
14. Mueller, J., Paluszek, M., and Zhao, Y., "Development of an Aerodynamic Model and Control Law Design for a High Altitude Airship", *AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference*, Workshop and Exhibit, (2004).
15. Azouz, N., Chaabani, S., Lerbet, J., and Abichou, A., "Computation of the Added Masses of an Unconventional Airship", *Journal of Applied Mathematics*, Vol. 2012, Article ID 714627, Pp.19 , (2012).
16. Tuveri, M., Ceruti, A., Persiani, F., and Marzocca, P., "A Mesh Based Approach for Unconventional Unmanned Airship Added Masses Computation", *SAE Technical Paper*, (2013).
17. Tuveri, M., Ceruti, A., and Marzocca, P., "Added Masses Computation for Unconventional Airships and Aerostats through Geometric Shape Evaluation and Meshing", *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 15, No. 3, Pp. 241-57, (2014).
18. Kanikdale, T., Marathe, A., and Pant, R., "Multi-Disciplinary Optimization of Airship Envelope Shape", *10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, (2004).
19. Currie IG., "Fundamental mechanics of fluids", CRC press, (2016).

Applying Suction and Blowing Flow Control Approaches for Reducing the Flow-Induced Instabilities of Elastically-Mounted Square Cylinder*

Research Article

Amir Hossein Rabiee¹ Mohammad Reza Barzan²
Abolfazl Mohammadebrahim³

1. Introduction

Structural vibrations are always of the most important challenges in the design and proper operation of all types of ground structures exposed to flow, such as buildings and stairs, marine structures like marine risers, and even aerial structures. Now, if the source of these vibrations is aerodynamic forces, the problem analysis of flow-structure interaction is very difficult. The instabilities caused by the flow can cause irreparable damages to the structures exposed to the flow. Usually, the fluctuations caused by aerodynamic forces are divided into flutter, vibrations caused by vortex separation, and galloping. Vibrations caused by vortex shedding are seen when the frequency of vortex shedding approaches the natural frequency of the oscillator system. Galloping is specific to structures with a non-circular and pointed cross-section, where the movement of the structure increases the range of aerodynamic forces and further increases the range of vibrations. Usually, the range of galloping fluctuations is greater than the range of vibrations caused by vortex separation, while it occurs at higher flow speeds. To model and analyze the instabilities caused by the flow, a cylinder with a circular cross-section is mainly used. Although the circular cylinder provides a basic and simple geometry for researchers, it cannot be used to observe other phenomena. A cylinder with a square cross-section as a non-circular geometry with sharp corners has recently received much attention from researchers.

Significant progress in material engineering has reduced the weight and flexibility of structures, which shows the need for flow control methods in order to reduce the vibrations caused by the flow. Suppression of these fluctuations is done by correcting the flow forces that cause vibrations by passive and active flow control methods. In the flow suction or blowing method, a groove or grooves are installed on the front or rear the surfaces of the cylinder, which can change the behavior of the flow-structure around the cylinder by suction or blowing the flow and consequently change the process of vortex shedding. This method has recently been used for controlling the flow around cylinders with a fixed square section (without vibration). But until now, the method of suction or blow flow control has not been used for reducing the fluctuations caused by the flow of a cylinder with a square section. Therefore, the main goal of the this

study is to use this method in order to change the flow behavior and consequently reduce the vibrations caused by the cylindrical flow with a square section that freely oscillates in the transverse direction in both the frequency locking and galloping regions. For this purpose, the effectiveness of flow suction method and flow blowing method were evaluated separately.

2. Numerical solution method

In this study, the external flow is considered on a square cylinder that vibrates freely in the direction perpendicular to the flow (Figure 1). Due to the application of oscillating forces that are applied to the square cylinder placed on the elastic bed by means of the current, the cylinder can freely oscillate in the transverse direction. Therefore, for the present fluid interaction problem, the cylinder can be modeled as a mass-spring-damper system.

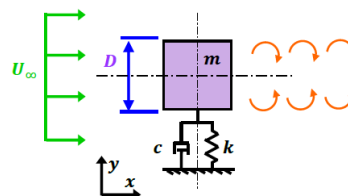
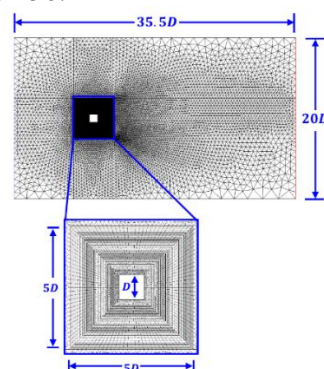


Figure 1. Square cylinder exposed to flow on an elastic bed

In each time step, the repetition process of equations is solved using Fluent commercial software. For this purpose, a user defined function is used. As can be seen in Figure 2, the mesh network includes unorganized triangular meshes and organized quadrilateral meshes (inside the square central part). In each repetition of the numerical solution process, the function of changing the shape of the displacement of the grid under the name of moving mesh changes the shape of the cells of the grid along with the movement of the cylinder, while the square central part that includes quadrilateral cells is moved along with the movement of the cylinder in the computing field and causes the mentioned tetrahedral cells to remain rigidly in the field.



* Manuscript received: 05 April 2021; Revised, 25 March 2022, Accepted, 25 June 2022.

¹. Corresponding author. Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Email: rabiee@arakut.ac.ir

². MSc Student, Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran.

³ Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Figure 2. The dimensions of the computing field, the way of meshing and placement of the cylinder in the computing field

As can be seen in Figure 3, the obtained results are in very good agreement with those reported some others researches.

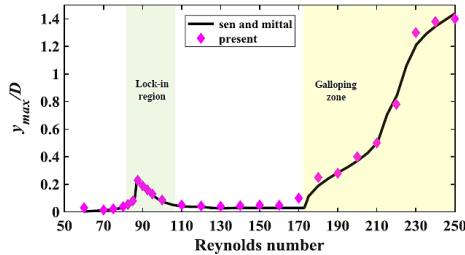


Figure 3. Maximum displacement changes of the square cylinder in terms of Reynolds number

3. Results and discussion

In this section, the numerical results related to the application of the flow surface suction and blowing method are presented in order to reduce the instabilities caused by the flow (vibrations caused by the separation of vortices and galloping) of a square cylinder placed on an elastic bed. As mentioned earlier, once the suction method and the blowing method were used to reduce the vibrations caused by the flow. For the suction method, a groove is used on the front surface of the cylinder, and a groove on its back surface is used for the tail. Moreover, the effectiveness of the mentioned methods was investigated in both frequency locking and galloping areas. Figure 4 shows the maximum changes of the transverse displacement range of the square cylinder according to the surface suction and blowing speed of the flow and the length of the groove. As can be seen in this figure, in the flow suction method, with the increase of the suction speed, the maximum displacement range of the square cylinder decreases. Here, the rate of displacement amplitude decreases with increasing suction speed. For the flow blowing method, increasing the power of the flow blowing leads to a significant decrease in the displacement range of the square cylinder. In the flow blowing method, it is possible to see a sharp reduction in the displacement range of the square cylinder between the dimensionless blowing speeds, after which the fluctuations caused by the square cylinder flow have been completely suppressed.

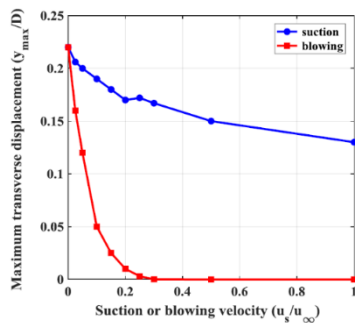


Figure 4. The maximum variation of the displacement range of the square cylinder according to the speed of suction and blowing for $Re = 87.5$

Moreover, by comparing the suction and blowing diagrams in Figure 4, it can clearly be seen that the

blowing method is much more effective than the current suction method for the frequency locking region.

Figure 5 shows the maximum changes of the transverse displacement of the square cylinder in terms of the suction speed and the surface blowing of the flow as a representative of the Reynolds number located in the galloping region per groove length.

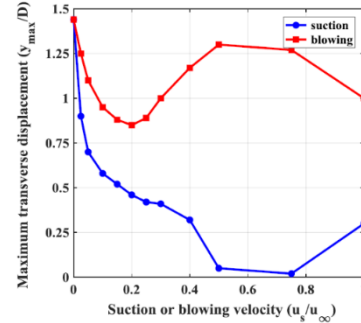


Figure 5. The maximum displacement range changes of the square cylinder according to the speed of suction and blowing for $Re = 250$

Table 1 summarizes different modes of control parameters.

Table 1. The percentage of vibration reduction in each of the investigated modes

blowing/suction	Reynolds Number	d/D	$u_{s,b}/u_{\infty}$	Percentage reduction (%)
suction	87.5	0.5	0.2	30
blowing			1	70
suction			0.05	45
blowing			0.2	95
suction	250		0.25	71
blowing			0.5	97
suction			0.2	41
blowing			1	31
suction	87.5	0.4	0.2	18
blowing		1		28
suction		0.2		65
blowing		0.7		98
suction	250	0.1		49
blowing		0.6		87
suction		0.2		44
blowing		1		17

4. Conclusion

In this study, the flow suction and blowing method was used to reduce the fluctuations caused by the flow of a cylinder with a square section that freely oscillates in the transverse direction for both frequency locking and galloping regions. According to the flow-structure interaction simulations, the mentioned method has succeeded in reducing the amplitude of vibrations caused by the separation of vortices and galloping. For the Reynolds number located in the frequency locking region, it can be seen that the suction of the flow at the suction speed $u_b/u_{\infty} \geq 0.2$ and groove length $d/D \geq 0.5$, it can significantly reduce the range of cylinder vibrations. It can also be seen that under the mentioned conditions, the vortex shedding formed behind the cylinder, are completely stopped in the uncontrolled state in the frequency locking region. Moreover, for the Reynolds number located in the galloping region, it can be seen that the flow suction can significantly reduce the galloping range.

اعمال روش کنترل جریان دمش و مکش به منظور کاهش ناپایداری‌های ناشی از جریان سیلندر مربعی قرار گرفته بر روی بستر الاستیک*

مقاله پژوهشی

امیرحسین ربیعی^(۱) محمدرضا برزن^(۲) ابوالفضل محمدابراهیم^(۳)

چکیده ناپایداری‌های ناشی از جریان یکی از چالش‌های اساسی در زمینه طراحی سازه‌های دریایی و زمینی در معرض جریان سیال به شمار می‌رود. روش‌های کنترلی غیرفعال و فعال بسیار متعددی برای کاهش نوسانات ناشی از جریان استوانه با مقطع مربعی به‌عنوان هندسه پایه‌ای برای سازه‌های دارای گوشه‌های تیز استفاده شده‌است. روش مکش و دمش جریان یکی از روش‌های اثربخش برای کنترل جریان و به تبع آن کاهش ارتعاشات حاصل از نیروهای آیرودینامیکی به حساب می‌آید که تا به حال برای استوانه مربعی قرار گرفته بر روی بستر الاستیک که آزادانه در جهت عرضی نوسان می‌کند، اعمال نشده‌است. بنابراین در مقاله حاضر جداگانه از روش‌های مکش و دمش برای سرکوب نوسانات ناشی از جریان بهره گرفته شده‌است. در روش مکش یک شیار در سطح جلویی استوانه و در روش دمش یک شیار در سطح پشتی استوانه جای‌گذاری شده‌است. در مطالعه حاضر اثر سرعت‌های مکش و دمش و همچنین اثر طول شیارهای مکش و دمش بر کارآمدی روش به‌کار گرفته شده، مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. با توجه به شبیه‌سازی‌های تعامل جریان-سازه‌ای مشاهده می‌شود که روش کنترل جریانی اعمال شده به‌خوبی توانسته‌است نوسانات ناشی از جریان را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی ارتعاشات ناشی از جریان، ریزش گردابه، کنترل جریان، گالوپینگ، هندسه مربعی.

مقدمه

می‌باشد که در آن حرکت سازه موجب افزایش دامنه نیروهای آیرودینامیکی و در ادامه افزایش دامنه ارتعاشات می‌شود. به‌طور معمول دامنه نوسانات گالوپینگ از دامنه ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه بیشتر است درحالی‌که در سرعت‌های جریان بالاتر اتفاق می‌افتد. برای مدل‌سازی و تحلیل ناپایداری‌های ناشی از جریان عمدتاً از استوانه با مقطع دایروی استفاده می‌شود [6]. استوانه دایروی اگر چه یک هندسه پایه‌ای و ساده برای محققان فراهم می‌کند ولی برای مشاهده پدیده‌های دیگر نمی‌توان از آن استفاده نمود. استوانه با مقطع مربعی به‌عنوان یک هندسه غیردایروی که دارای گوشه‌های تیز می‌باشد به تازگی بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته‌است [4,7].

پیشرفت چشم‌گیر در مهندسی مواد، موجب کاهش وزن و انعطاف بیشتر سازه‌ها شده‌است که این موضوع نیاز به روش‌های کنترل جریان به‌منظور کاهش ارتعاشات ناشی از جریان را بیشتر نشان می‌دهد. سرکوب این نوسانات توسط اصلاح نیروهای جریان که عامل ارتعاشات هستند توسط روش‌های کنترل جریان

ارتعاشات سازه‌ای همواره یکی از چالش‌های بسیار مهم در طراحی و کارکرد صحیح انواع سازه‌های زمینی در معرض جریان مانند ساختمان‌ها و پل‌ها، سازه‌های دریایی مانند ریزرهای دریایی و حتی سازه‌های هوایی به شمار می‌آید. حال اگر منبع این ارتعاشات نیروهای آیرودینامیکی باشد، تحلیل مسئله تعامل جریان-سازه‌ای بسیار مشکل می‌باشد [1,2]. ناپایداری‌های ناشی از جریان می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به سازه‌های در معرض جریان وارد نماید. به‌طور معمول نوسانات ناشی از نیروهای آیرودینامیکی به فلاتر (Flutter)، ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه ((Vortex-induced vibration (VIV)، و گالوپینگ (Galloping) تقسیم‌بندی می‌شود [3-5]. فلاتر مرتبط با ترکیب ارتعاشات خطی و پیچشی می‌باشد. ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه هنگامی دیده می‌شود که فرکانس ریزش گردابه‌ها (Vortex shedding) به فرکانس طبیعی سیستم نوسانگر نزدیک شود. گالوپینگ تنها مختص به سازه‌های با مقطع غیر دایروی و نوک‌تیز

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۱/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۴/۴ می‌باشد.

Email: rabiee@arakut.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک.

(۲) کارشناس ارشد، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک.

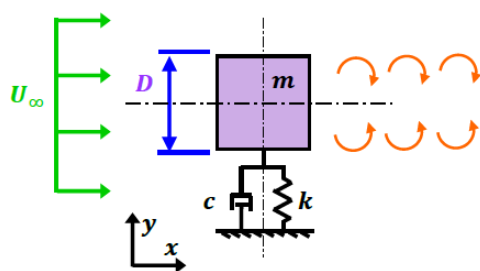
(۳) استادیار، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک.

روش حل عددی

در این مطالعه، جریان خارجی بر روی یک استوانه مربعی که آزادانه در جهت عمود بر جریان ارتعاش می کند، در نظر گرفته شده است. شماتیکی از استوانه مربعی که بر روی یک بستر الاستیک قرار گرفته است در شکل (۱) مشاهده می شود. دامنه حل به شکل مستطیل با طول $35.5D$ و عرض $20D$ در نظر گرفته شده است و استوانه مربعی با ابعاد $D \times D$ به فاصله $10D$ از مرزهای بالایی و پایینی قرار گرفته است. شکل (۴) ابعاد فضای محاسباتی به شبکه مش بندی شده را نشان می دهد. با در نظر گرفتن جریان پایا، دوبعدی، تراکم ناپذیر و آرام و فرض نیوتنی بودن سیال، معادله بقای جرم (پیوستگی) به صورت معادله (۱) خواهد بود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

که در آن u سرعت در جهت x ، v سرعت در جهت y هستند. شرایط مرزی نیز برای مرز بالادست $u = U_\infty, v = 0$ ، مرز پایین دست $\frac{\partial v}{\partial x} = 0, \frac{\partial u}{\partial x} = 0$ ، روی استوانه مربعی شرط مرزی عدم لغزش $u = 0, v = 0$ ، و مرزهای بالایی و پایینی $\frac{\partial u}{\partial y} = 0, v = 0$ در نظر گرفته شده است. هم چنین جریان در شیارهای مکش و دمش سرعت نرمال $u = u_s/b$ مشخص می شود.

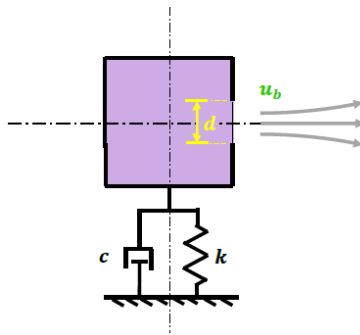


شکل ۱ استوانه مربعی در معرض جریان قرار گرفته بر روی بستر الاستیک

به دلیل اعمال نیروهای نوسانی که به واسطه جریان به استوانه مربعی قرار گرفته بر روی بستر الاستیک وارد می شود، استوانه می تواند آزادانه در جهت عرضی نوسان کند. بنابراین برای مسئله تعامل جریان سازه ای حاضر، می توان استوانه را به صورت یک سیستم جرم-فنر-دمپر با جرم m سفتی k ، و ضریب میرایی c مدل کرد. طبق قانون دوم نیوتن معادله حرکت استوانه بدین شکل نوشته می شود:

غیرفعال و فعال صورت می گیرد. روش های کنترل جریان غیرفعال مانند نوارهای مارپیچ (Helical strakes)، صفحه های جداساز (Splitter plate)، فیرینگ (Fairing)، پوشش های زیر و... به منبع انرژی خارجی نیاز ندارند و در عمل، پیاده سازی نسبتاً ساده تری دارند [8]. به هر حال، روش های غیرفعال، غیر تطبیقی هستند و می بایست پارامترهای هندسی روش های مذکور با توجه به ویژگی های سازه ای و محیطی از قبل تعیین شوند که پس از ساخت امکان تغییر آن ها وجود ندارد. از طرف دیگر روش های کنترل فعال با اعمال انرژی خارجی می توانند اثربخشی بیشتری نسبت به روش های کنترل غیرفعال از خود به نمایش بگذارند. روش های کنترل فعال متعددی از جمله روش پلاسما، کنترل لایه مرزی، اعمال مستقیم نیروی کنترلی، استوانه های چرخشی و روش مکش یا دمش سطحی جریان، وجود دارند که از طریق اصلاح دنباله گردابه پشت سازه می توانند ناپایداری های ناشی از جریان را کاهش دهند [9,10]. روش آخر، یکی از اثربخش ترین روش های کنترل جریان و به تبع آن کاهش نوسانات ناشی از جریان به حساب می آید که توسط محققان متعددی برای استوانه دایروی قرار گرفته بر روی بستر الاستیک قرار گرفته است [11]. در روش مکش یا دمش جریان شیار یا شیارهایی در سطوح جلویی یا عقبی استوانه تعبیه شده که با مکش یا دمش جریان می توانند رفتار جریان-سازه ای حول استوانه و به تبع آن روند ریزش گردابه ها را تغییر دهند. هم چنین این روش به تازگی برای کنترل جریان حول استوانه های با مقطع مربعی ثابت (بدون ارتعاش) نیز استفاده شده است؛ ولی تا به حال از روش کنترل جریانی مکش یا دمش (Suction or blowing flow control methods) برای کاهش نوسانات ناشی از جریان استوانه با مقطع مربعی بهره گرفته نشده است. بنابراین هدف اصلی مطالعه حاضر، به کارگیری از این روش به منظور تغییر رفتار جریان و به تبع آن کاهش ارتعاشات ناشی از جریان استوانه با مقطع مربعی که آزادانه در جهت عرضی نوسان کرده در هر دو منطقه قفل شدگی فرکانسی و گالوپینگ می باشد. برای این منظور به صورت جداگانه اثربخشی روش مکش جریان شکل (۲) و روش دمش جریان شکل (۳) مورد ارزیابی قرار گرفته است.

Blowing flow control method



شکل ۳ روش کنترلی دمش جریان

در نرم افزار فلوئنت از فرمولاسیون مرتبه اول حل کننده ضمنی بر پایه فشار برای حل معادلات بقا و مومنتوم جریان به کار گرفته شده است. جریان اطراف استوانه آرام و گذرا است و خواص فیزیکی سیال به گونه ای ثابت فرض شده اند که شرایط عدد رینولدز مورد نظر را فراهم کند. برای گسسته سازی ترم های فشار و مومنتوم به ترتیب از روش های استاندارد و بالادست مرتبه دوم استفاده شده است. در این شبیه سازی عددی به منظور کاهش زمان محاسبات و همچنین افزایش دقت پیش روی در زمان به خصوص در شرایطی که مش های شبکه دینامیکی تعریف شده اند از روش گام جزئی بهره گرفته شده است. این روش با فعال کردن گذشت زمان غیر تکراری (Non-iterative time advancement) میسر می شود که سبب افزایش بازده محاسبات عددی در گذر زمان می گردد.

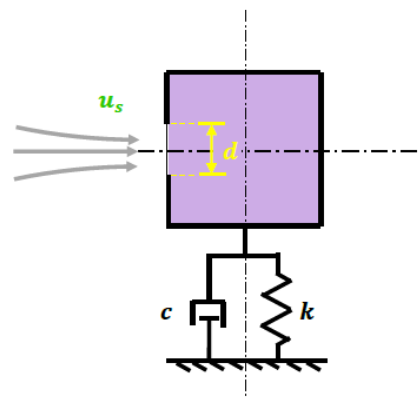
با توجه به معادله (۲) مشخص می باشد که ضریب برآ نقش مهمی در کوپل کردن معادله حرکت استوانه با میدان جریان اطراف آن ایفا می کنند. این ضریب توسط کد تابع کاربر در هر گام زمانی از حل کننده فلوئنت فراخوانی شده تا توسط تابع حرکت مرکز گرایش جسم صلب (CG Motion) تعریف شوند. سپس در کد تابع کاربر مقادیر شتاب و به تبع آن سرعت استوانه به دست آورده می شوند. به طور خلاصه روند حل عددی از این قرار می باشد: ابتدا معادله جریان در نرم افزار فلوئنت حل شده و نیروی برآی وارد بر استوانه محاسبه می شود. سپس کد تابع کاربر که در داخل خود نرم افزار بارگذاری شده است، نیروی برآی وارد بر استوانه را خوانده و بر اساس آن معادله حرکت استوانه را حل می کند. با حل معادله حرکت، شتاب، سرعت و جابه جایی استوانه

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_L \quad (2)$$

که در y ، $\dot{y}$ و $\ddot{y}$ آن به ترتیب مشخص کننده جابه جایی، سرعت و شتاب عرضی استوانه و F_L نیروی برآی وارد بر استوانه می باشد.

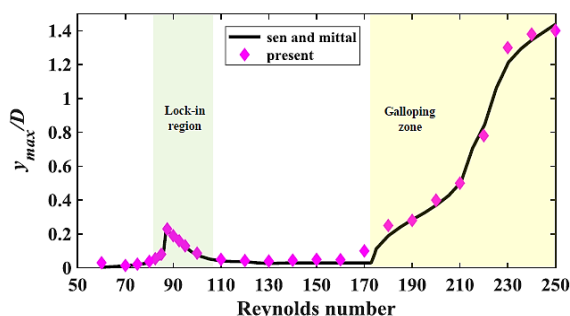
در هر گام زمانی فرایند تکرار معادله (۱) با استفاده از نرم افزار تجاری فلوئنت حل می شود. بدین منظور از یک کد تابع کاربر (User defined function (UDF)) استفاده شده است. همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود، شبکه مش بندی شامل مش های مثلثی بی سازمان و مش های چهارضلعی سازمان یافته (داخل بخش مرکزی مربعی شکل) می باشند. در هر تکرار از فرایند حل عددی تابع تغییر فرم جابه جایی شبکه تحت عنوان مش متحرک (Moving/deforming mesh (MDM)) فرم سلول های شبکه را همراه با حرکت استوانه تغییر می کند. در حالی که بخش مرکزی مربعی شکلی که شامل سلول های چهار ضلعی می باشد همراه با حرکت استوانه در میدان محاسباتی جابه جا شده و سبب می شود که سلول های چهاروجهی مذکور به صورت صلب در میدان باقی بمانند. این تکنیک روش جابه جایی مش نامیده می شود، که سبب افزایش دقت در محاسبات عددی به خصوص در مرزهای مجاور جسم صلب متحرک در میدان محاسباتی گشته و خطای تصویر (projection error) را تا حد مینیمم کاهش می دهد. این در حالی است که سلول های مثلثی شکل خارج بخش مرکزی، دچار تغییر شکل نیز می شوند.

Suction flow control method



شکل ۲ روش کنترلی مکش جریان

استوانه می رسد، قفل شدگی فرکانسی اتفاق می افتد که منجر به افزایش دامنه ارتعاشات می شود. پدیده گالوپینگ تنها مختص به سازه های با مقطع غیر دایروی و نوک تیز می باشد که در آن حرکت سازه موجب افزایش دامنه نیروهای آیرودینامیکی و در ادامه افزایش دامنه ارتعاشات می شود و در محدوده اعداد رینولدز بالاتر ($Re \geq 170$) دیده می شود.

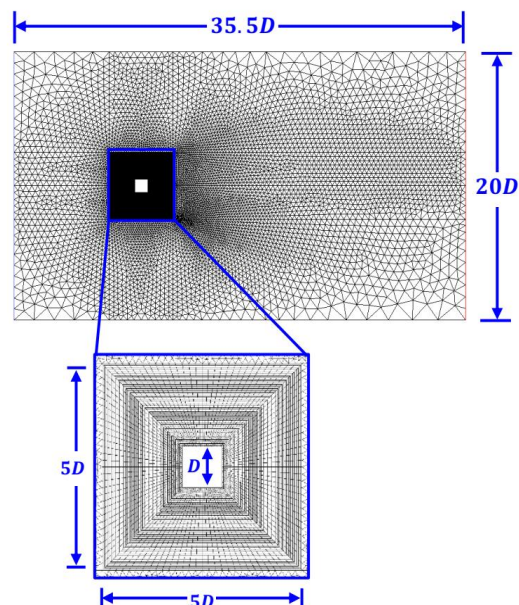


شکل ۵ تغییرات بیشینه جابه جایی استوانه مربعی بر حسب عدد رینولدز

دلیل استفاده از محدوده اعداد رینولدز در این مطالعه و پژوهش های مشابه، محدودیت های مربوط به توان محاسباتی می باشد. در محدوده اعداد رینولدز کمی بالاتر، هسته گردابه ها توربولانت و دارای ماهیت سه بعدی خواهد شد که برای حل میدان جریان می بایست از مدل های توربولانت بهره گرفت. در صورت استفاده از فضای سه بعدی، تعداد مش ها بسیار بالا خواهد شد که در نتیجه آن زمان محاسبات بسیار افزایش می یابد. این مسئله به خصوص در مدل سازی ارتعاشات ناشی از جریان که از روش حل جابه جایی مش نیز استفاده می شود، بسیار پیچیده می شود. در نتیجه، در صورت بهره گیری از مدل های توربولانت، به دلیل زمان محاسباتی بسیار بالا نمی توان اثر پدیده های مختلف بر رفتار جریان-سازه ای سیستم ارتعاشی مورد مطالعه را ارزیابی نمود (تعداد شبیه سازی ها غالباً در مطالعات مشابه بسیار بالا است). یکی از روش های به کار گرفته شده برای حل این مشکل، بهره گیری از مدل های حل جریان آرام و استفاده از مدل های دو بعدی است.

انتخاب اندازه مش مناسب، برای به دست آوردن نتایج دقیق بسیار مهم و ضروری می باشد. هر چه اندازه مش ها کوچک تر شود به تبع آن تعداد مش ها بیشتر می شود، که این باعث افزایش دقت به ازای افزایش زمان محاسباتی (هزینه محاسباتی) می باشد.

محاسبه می شود. سپس این مقادیر باعث تغییر موقعیت استوانه داخل میدان محاسباتی می شود. هم چنین، شرایط مرزی و شبکه مش بندی نیز به روزرسانی می شوند.



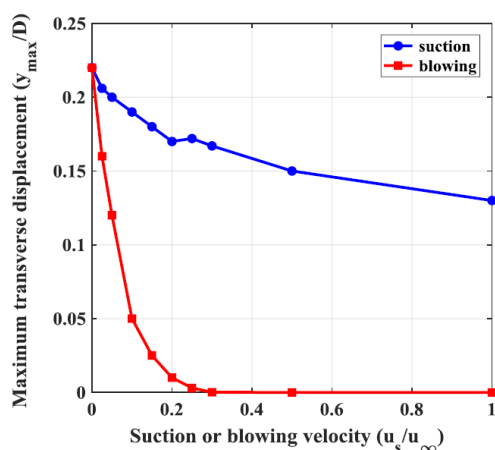
شکل ۴ ابعاد میدان محاسباتی، نحوه مش بندی و قرارگیری استوانه در میدان محاسباتی

قبل از ارائه نتایج، اعتبارسنجی شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار می گیرد. به همین منظور مقدار پارامترهای ورودی از قرار $m^* = 10, \xi = 0, B = 0.05; f_n^* = f_n D / U_\infty = 14.39 / Re$ در نظر گرفته شده و سپس تغییرات بیشینه دامنه نوسانات عرضی استوانه بر حسب عدد رینولدز برای استوانه مربعی قرار گرفته بر روی بستر الاستیک، به دست آورده شده است. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود، نتایج به دست آمده با آنچه در مرجع [12] گزارش شده است، تطابق بسیار خوبی دارد. لازم به ذکر است، دلیل رخداد پدیده قفل شدگی فرکانسی، نزدیک شدن فرکانس ریزش گردابه ها به فرکانس طبیعی استوانه در محدوده اعداد رینولدز $85 \leq Re \leq 105$ می باشد. در واقع، پارامترهای فیزیکی استوانه نظیر مقدار جرم و ثابت فنر، به گونه ای تنظیم شده اند که پدیده تشدید در محدوده اعداد رینولدز ذکر شده اتفاق بیافتد. به بیان دیگر، با افزایش عدد رینولدز، فرکانس ریزش گردابه ها افزایش می یابد. هنگامی که فرکانس ریزش گردابه به نزدیکی فرکانس طبیعی

شده است، به طوری که با کاهش مجدد گام زمانی، تغییرات زیادی در نتایج مشاهده نمی شود.

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج عددی مرتبط با اعمال روش مکش و دمش سطحی جریان به منظور کاهش ناپایداری های ناشی از جریان (ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه ها و گالوپینگ) یک استوانه مربعی که بر روی بستر الاستیک قرار گرفته است، ارائه شده است. همان طور که پیش تر ذکر شد، یک بار از روش مکش و بار دیگر از روش دمش برای کاهش ارتعاشات ناشی از جریان استفاده شده است. برای روش مکش یک شیار در سطح جلویی استوانه و برای دمش از یک شیار در سطح پشتی آن استفاده شده است. هم چنین اثربخشی روش های مذکور در هر دو ناحیه قفل شدگی فرکانسی و ناحیه گالوپینگ مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل (۵) عدد رینولدز $Re = 87.5$ برای ناحیه قفل شدگی فرکانسی و عدد رینولدز $Re = 250$ برای ناحیه گالوپینگ انتخاب شده اند. جرم بی بعد شده استوانه مربعی برابر با $m^* = 10$ و فرکانس طبیعی کاهش برابر با $f_n^* = f_n D / U_\infty$ در این بخش ابتدا تغییرات سرعت جریان در شیارهای مکشی/دمشی مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه با انتخاب سرعت بهینه، تغییرات طول شیارها مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۶ تغییرات پیشینه دامنه جابه جایی استوانه مربعی بر حسب سرعت مکش و دمش برای $Re = 87.5$

در نتیجه می بایست تعادلی بین تعداد مش و دقت محاسباتی برقرار نمود. برای این منظور، شکل کلی مش ها ثابت نگاه داشته شده و اثر اندازه مش ها در سه حالت مختلف (از درشت به ریز بررسی شده است. جدول (۱)، ضریب پسای متوسط و جذر میانگین مربعات (Root mean square (RMS) ضریب برآ به ازای شبکه های مختلف را برای استوانه ثابت با سطح مقطع مربعی در $Re = 100$ نشان می دهد. با توجه به مقادیر نشان داده شده در جدول (۱)، استنباط می شود که حالت ۲ که دارای اندازه مش های 28000 (در بخش مرکزی) می باشد توانسته است مصالحه مناسبی بین دقت و هزینه محاسباتی برقرار کند.

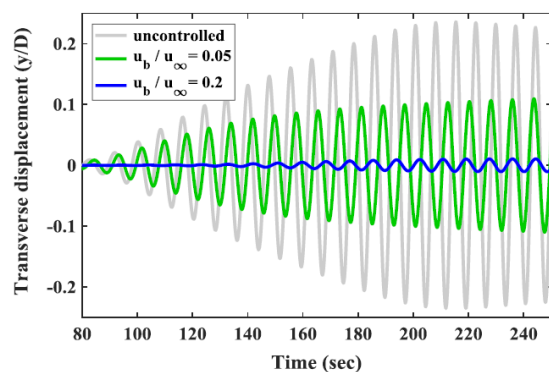
جدول ۱ اثر تعداد مش ها بر ضرایب آیرودینامیکی استوانه مربعی ثابت

	تعداد کل مش ها	تعداد مش ها در ناحیه مرکزی	C_L^{RMS}	$\bar{C}_D$
حالت ۱	۱۰۰۰۰	۳۵۰۰	۰/۲۲۷	۱/۶۶۲
حالت ۲	۲۸۰۰۰	۸۰۰۰	۰/۱۹۸	۱/۵۲۴
حالت ۳	۸۰۰۰۰	۱۱۰۰۰	۰/۱۹۷	۱/۵۲۱

جدول ۲ اثر گام زمانی بر ضرایب آیرودینامیکی استوانه مربعی ثابت

Δt	C_L^{RMS}	$\bar{C}_D$
۰/۰۵	۰/۲۹۳	۲/۰۳۵
۰/۰۴	۰/۲۶۶	۱/۸۱۴
۰/۰۳	۰/۲۳۷	۱/۶۸۵
۰/۰۲	۰/۲۱۶	۱/۵۹۳
۰/۰۱	۰/۱۹۸	۱/۵۲۴
۰/۰۰۵	۰/۱۹۶	۱/۵۲۲

اندازه گام زمانی نیز پارامتر مهم دیگری می باشد که برای دستیابی به دقت حل مناسب می بایست مورد توجه قرار گیرد. در این جا نیز گام زمانی کوچک تر می تواند منجر به افزایش دقت محاسباتی به ازای افزایش زمان یا هزینه محاسباتی شود. در نتیجه، با در نظر گرفتن شبکه با تعداد مش مشخص شده در حالت ۲، مجدداً ضریب پسای متوسط و جذر میانگین مربعات ضریب برآ، این بار برای گام زمانی با مقادیر مختلف محاسبه و در جدول (۲) لیست شده اند. همان طور که در جدول (۲) مشاهده می شود، گام زمانی $\Delta t = 0.01$ منجر به نتایج با دقت قابل قبولی



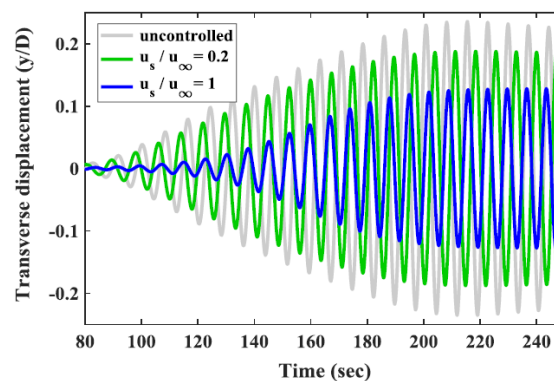
شکل ۸ پاسخ زمانی جابه جایی بی بعد شده استوانه مربعی برای سرعت های دمش $u_s/u_\infty = 0.05$ و $u_s/u_\infty = 0.2$ در $Re = 87.5$

همان طور که در شکل های (۷ و ۸) مشاهده می شود، پاسخ زمانی جابه جایی استوانه مربعی به صورت نوسانی است و برای عدد رینولدز $Re = 87.5$ واقع در ناحیه قفل شدگی فرکانسی، با فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم نوسانگر، ارتعاش می کند. در این جا دیده می شود که روش مکش جریان برای سرعت های مکش منتخب $u_s/u_\infty = 0.2$ و $u_s/u_\infty = 1$ توانسته است، بیشینه دامنه جابه جایی استوانه مربعی را به ترتیب به میزان ۳۰ و ۷۰ درصد نسبت به حالت کنترل نشده کاهش دهد. همچنین روش دمش جریان برای سرعت های دمش $u_b/u_\infty = 0.05$ و $u_b/u_\infty = 0.2$ موفق شده است، بیشینه دامنه جابه جایی استوانه را به ترتیب به مقدار ۴۵ و ۹۵ درصد کاهش دهد. لازم به ذکر است در روش دمش جریان برای سرعت های دمش بالاتر، درصد کاهش ارتعاشات استوانه نزدیک به ۱۰۰ درصد می شود که این نشان دهنده کاهش یا سرکوب کامل نوسانات ناشی از جریان استوانه مربعی می باشد.

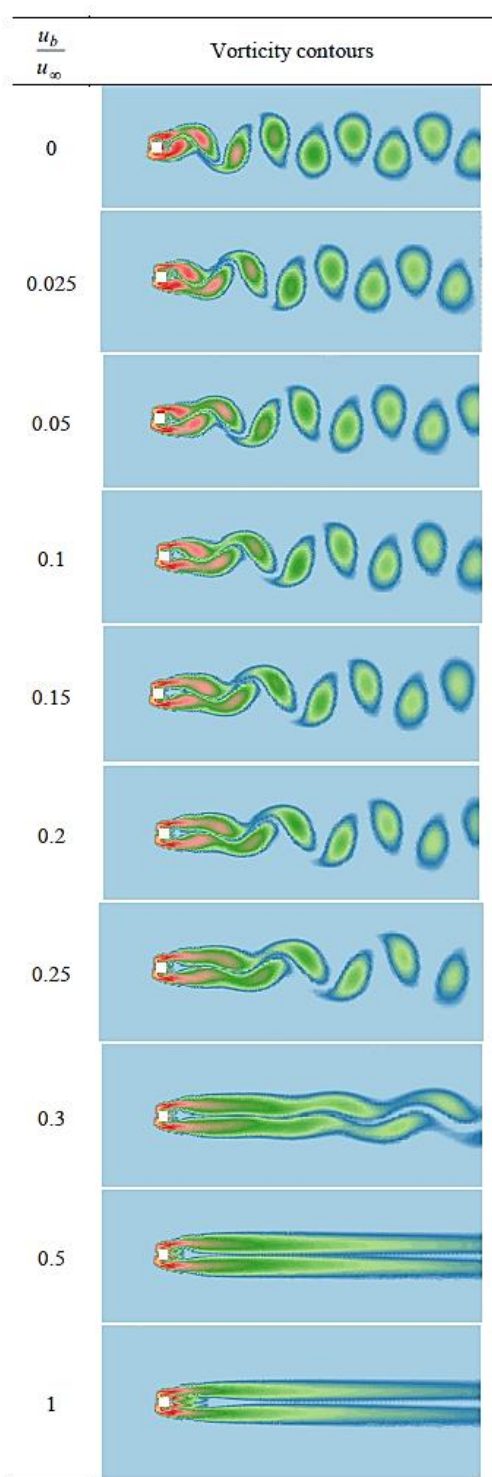
شکل های (۹ و ۱۰) تصاویر مربوط به ساختار گردابه ای تشکیل شده پشت استوانه مربعی برای $Re = 87.5$ و طول شیار $d/D = 0.5$ را به ازای تغییرات سرعت به ترتیب در روش های مکش و دمش جریان نشان می دهند. مشاهده می شود که برای استوانه کنترل نشده گردابه ها به صورت متناوب از گوشه های بالا و پایین استوانه مربعی ریخته شده که نشان دهنده حالت 2S دنباله گردابه ها می باشد. همان طور که در شکل (۹) مشاهده می شود، با افزایش سرعت مکش جریان، تغییر محسوسی در ساختار گردابه ای تشکیل شده پشت استوانه اتفاق نمی افتد. حالت گردابه ها، اندازه و فاصله آن ها تقریباً به ازای تمامی سرعت های

شکل (۶) تغییرات بیشینه دامنه جابه جایی عرضی استوانه مربعی بر حسب سرعت مکش و دمش سطحی جریان برای $Re = 87.5$ و طول شیار $d/D = 0.5$ را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، در روش مکش جریان، با افزایش سرعت مکش، بیشینه دامنه جابه جایی استوانه مربعی کاهش می یابد. در این جا نرخ کاهش دامنه جابه جایی، با افزایش سرعت مکش، کاهش می یابد. برای روش دمش جریان نیز، افزایش قدرت دمش جریان، منجر به کاهش بیشینه دامنه جابه جایی استوانه مربعی می شود. در روش دمش جریان، می توان کاهش شدید دامنه جابه جایی استوانه مربعی بین سرعت های دمش بی بعد شده $0.2 > u_b/u_\infty > 0$ را مشاهده نمود که پس از آن، نوسانات ناشی از جریان استوانه مربعی به طور کامل سرکوب شده است. همچنین با مقایسه نمودارهای مکش و دمش در شکل (۶) به خوبی می توان اثربخشی بسیار بیشتر روش دمش نسبت به روش مکش جریان را برای ناحیه قفل شدگی فرکانسی مشاهده نمود.

در ادامه، به منظور مشاهده بهتر، نمودارهای پاسخ زمانی جابه جایی بی بعد شده استوانه مربعی در سرعت های مکش و دمش منتخب، ارائه می شود. برای این منظور شکل (۷) تاریخچه زمانی جابه جایی بی بعد شده استوانه مربعی برای سرعت های مکش منتخب $u_s/u_\infty = 0.2$ و $u_s/u_\infty = 1$ در عدد رینولدز $Re = 87.5$ و طول شیار $d/D = 0.5$ را نشان می دهد. همچنین شکل (۸) نمودار مشابه برای روش دمش جریان برای سرعت های دمش $u_b/u_\infty = 0.05$ و $u_b/u_\infty = 0.2$ را ارائه می دهد.



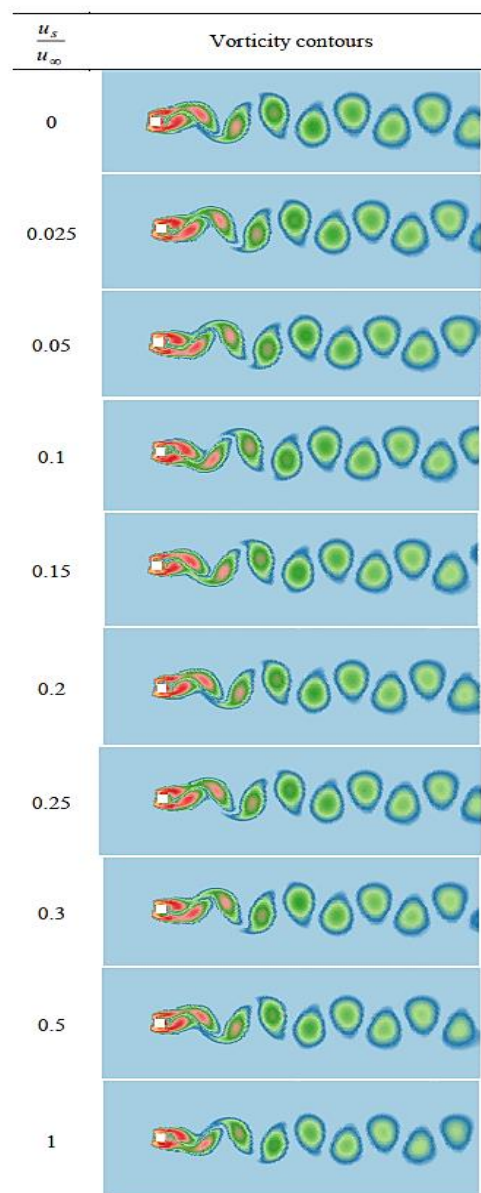
شکل ۷ پاسخ زمانی جابه جایی بی بعد شده استوانه مربعی برای سرعت های مکش $u_s/u_\infty = 0.2$ و $u_s/u_\infty = 1$ در $Re = 87.5$



شکل ۱۰ کانتورهای ورتیسیته برای تغییرات سرعت دمش در $Re = 87.5$

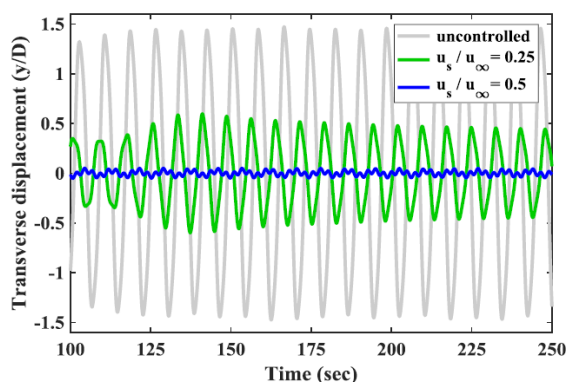
لازم به ذکر است برای عدد رینولدز $Re = 87.5$ واقع در ناحیه قفل‌شدگی فرکانسی، سرعت مکش و دمش بی بعدشده برابر با 0.2 به عنوان سرعت منتخب به دلیل برقراری مصالحه

مکش جریان، ثابت می‌باشد که این نشان‌دهنده عدم تأثیرگذاری روش مکش جریان در ساختار ریزش گردابه‌ها است. اما شرایط برای روش دمش جریان در $Re = 87.5$ متفاوت می‌باشد. در روش دمش جریان با افزایش سرعت دمش، به تدریج لایه برشی تشکیل شده در پشت استوانه کشیده شده، و فاصله گردابه‌ها از یکدیگر بیشتر می‌شود. این تغییرات ادامه پیدا کرده تا جایی که برای $u_b/u_\infty > 0.3$ به طور کامل ریزش گردابه‌ها متوقف شده و دیگر هیچ گردابه‌ای در پشت استوانه مشاهده نمی‌شود.

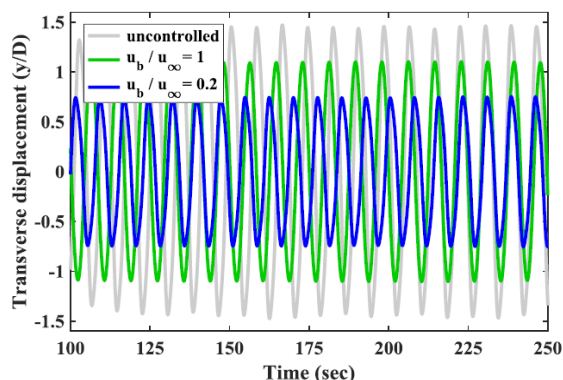


شکل ۹ کانتورهای ورتیسیته برای تغییرات سرعت مکش در $Re = 87.5$

دمش منتخب، ارائه می‌شود. برای این منظور شکل (۱۲) تاریخچه زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شده استوانه مربعی برای سرعت‌های مکش منتخب $u_s/u_\infty = 0.25$ و $u_s/u_\infty = 0.5$ در عدد رینولدز $Re = 250$ و طول شیار $d/D = 0.5$ را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱۳) نمودار مشابه برای روش دمش جریان برای سرعت‌های دمش $u_b/u_\infty = 0.2$ و $u_b/u_\infty = 1$ ارائه می‌دهد.



شکل ۱۲ پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شده استوانه مربعی برای سرعت‌های مکش $u_s/u_\infty = 0.25$ و $u_s/u_\infty = 0.5$ در $Re = 250$

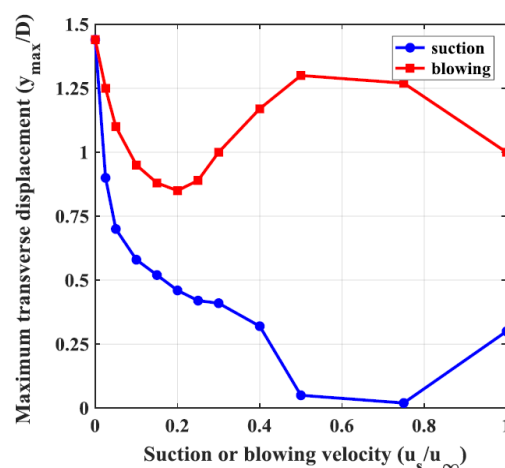


شکل ۱۳ پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شده استوانه مربعی برای سرعت‌های دمش $u_b/u_\infty = 0.2$ و $u_b/u_\infty = 1$ در $Re = 250$

همان‌طور که در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مشاهده می‌شود، بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی در ناحیه گالوپینگ نسبت به ناحیه قفل شدگی فرکانسی به مراتب بالاتر می‌باشد. در این جا دیده می‌شود که روش مکش جریان برای سرعت‌های مکش منتخب $u_s/u_\infty = 0.25$ و $u_s/u_\infty = 0.5$ توانسته است، بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی را به ترتیب به میزان ۷۱ و

مناسب بین درصد کاهش نوسانات ناشی از جریان استوانه و همچنین مصرف انرژی، برای بررسی طول شیارها، انتخاب شده است. شکل (۱۱) تغییرات بیشینه دامنه جابه‌جایی عرضی استوانه مربعی بر حسب سرعت مکش و دمش سطحی جریان برای $Re = 250$ به عنوان نماینده عدد رینولدز واقع در ناحیه گالوپینگ به ازای طول شیار $d/D = 0.5$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش مقدمه گفته شد، از یک سرعت جریانی بحرانی به بعد، نوسانات استوانه مربعی موجب ایجاد نیروهای آیرودینامیکی بزرگ‌تری به جسم می‌شود که این امر موجب افزایش هر چه بیشتر دامنه جابه‌جایی استوانه می‌گردد.

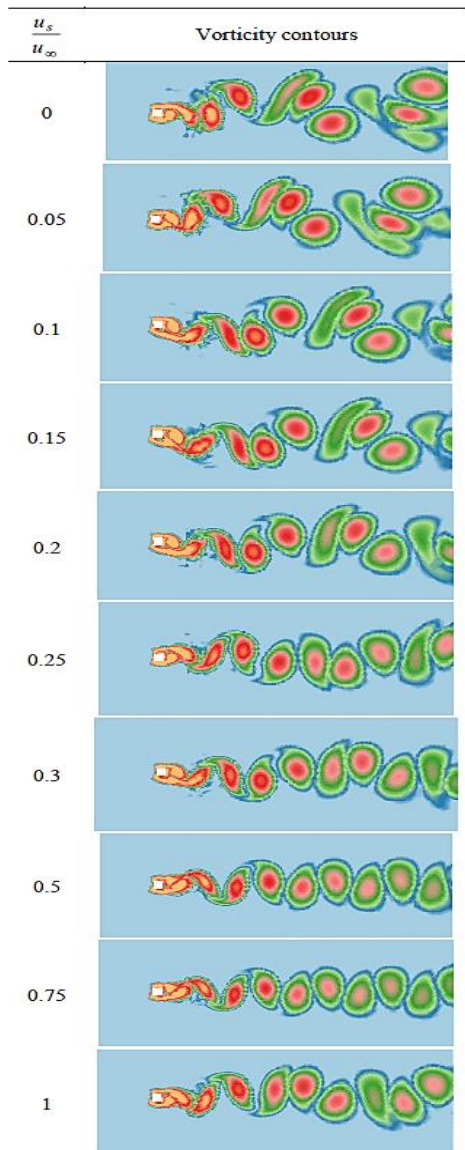
همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، در روش مکش جریان، با افزایش سرعت مکش، بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی کاهش یافته و در محدوده $0.4 < u_s/u_\infty < 0.8$ به حداقل مقدار خود می‌رسد. برای روش دمش جریان نیز، با افزایش سرعت دمش، ابتدا بیشینه جابه‌جایی استوانه مربعی در محدوده $0.2 < u_b/u_\infty < 0.4$ کاهش یافته، بعد از آن افزایش و مجدداً اندکی کاهش می‌یابد. در اینجا، بر خلاف عدد رینولدز $Re = 87.5$ روش مکش جریان اثربخشی بیشتری نسبت به روش دمش جریان در کاهش نوسانات استوانه از خود به نمایش گذاشته است.



شکل ۱۱ تغییرات بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی بر حسب سرعت مکش و دمش برای $Re = 250$

در ادامه، به منظور مشاهده بهتر، نمودارهای پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شده استوانه مربعی در سرعت‌های مکش و

موجب کاهش نه چندان بزرگی در بیشینه دامنه جابه جایی استوانه مربعی شده است. در این جا نیز همانند قبل دیده می شود که روش مکش جریان، روش مؤثری حتی با تغییر طول شیارها برای کاهش نوسانات ناشی از جریان استوانه مربعی نمی باشد. در نقطه مقابل مشاهده می شود که روش دمشی جریان، توانسته است به مقدار قابل توجهی ارتعاشات استوانه را کاهش دهد. در این جا با افزایش طول شیار دمشی، بیشینه دامنه جابه جایی استوانه به شدت کاهش پیدا کرده است تا جایی که برای نسبت $d/D > 0.6$ درصد کاهش ارتعاشات نزدیک به ۱۰۰ درصد می شود.



شکل ۱۴ کانتورهای ورتیسیته برای تغییرات سرعت مکش در $Re = 250$

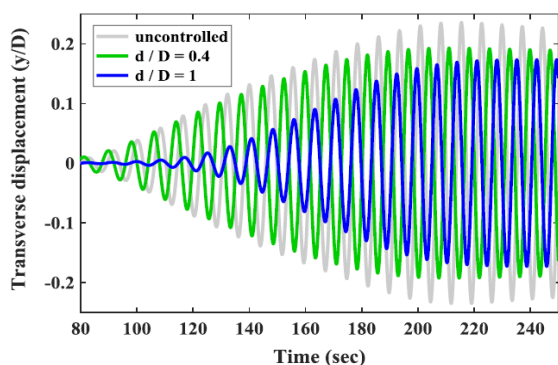
۹۷ درصد نسبت به حالت کنترل نشده کاهش دهد. هم چنین روش دمشی جریان برای سرعت های دمشی $u_b/u_\infty = 0.2$ و $u_s/u_\infty = 1$ موفق شده است، بیشینه دامنه جابه جایی استوانه را به ترتیب به مقدار ۴۱ و ۳۱ درصد کاهش دهد.

در ادامه، شکل های (۱۴ و ۱۵) تصاویر مربوط به ساختار گردابه ای تشکیل شده پشت استوانه مربعی برای $Re = 250$ و طول شیار $d/D = 0.5$ به ازای تغییرات سرعت به ترتیب در روش های مکش و دمشی جریان را نشان می دهند. در این جا مشاهده می شود که ساختار گردابه ای تشکیل شده پشت استوانه کنترل نشده، مرتبط با حالت گردابه ای $2P+2S$ می باشد که در آن دو گردابه از یک سطح و یک گردابه از سطح دیگر به طور متناوب طی یک دوره ارتعاشی کامل، ریخته می شوند. با توجه به شکل (۱۴) با افزایش قدرت مکش جریان همان طور که در شکل (۱۱) نیز دیده شد، دامنه گالوپینگ در محدوده $0.4 < u_s/u_\infty < 0.8$ به شدت کاهش پیدا می کند که این کاهش موجب تغییر ساختار گردابه ای تشکیل شده پشت استوانه از حالت گردابه ای $2P+2S$ به $2S$ می شود. هم چنین همان طور که در شکل (۱۵) مشاهده می شود، با افزایش سرعت دمشی، اگر چه طول لایه برشی افزایش پیدا کرده است ولی در نهایت این تغییر موفق به متوقف کردن ریزش گردابه ها به گونه ای که برای $Re = 87.5$ اتفاق افتاد، نشده است.

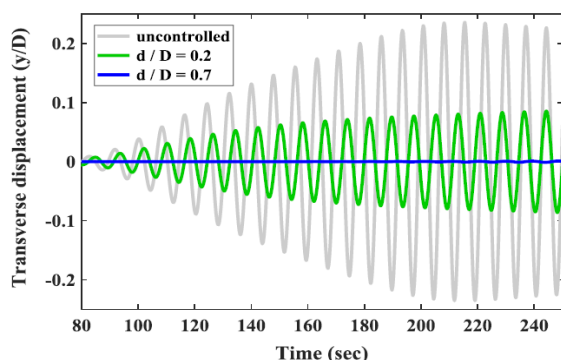
لازم به ذکر است برای عدد رینولدز $Re = 250$ واقع در ناحیه گالوپینگ، به منظور دستیابی به مصالحه مناسب بین درصد کاهش نوسانات ناشی از جریان استوانه و هم چنین مصرف انرژی، سرعت مکش برابر با 0.6 و دمشی بعدشده برابر با 0.2 به عنوان سرعت های منتخب، برای بررسی طول شیارها، انتخاب شده است.

در ادامه، اثر تغییرات شیارهای مکش و دمشی بر نوسانات ناشی از جریان استوانه مربعی و هم چنین ساختار گردابه ای مورد بررسی قرار می گیرد. برای این منظور سرعت مکش و دمشی ثابت نگاه داشته شده و تغییرات طول شیارها مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای این منظور، شکل (۱۶) تغییرات بیشینه دامنه جابه جایی عرضی استوانه مربعی بر حسب تغییرات طول شیارهای مکش و دمشی برای $Re = 87.5$ و سرعت مکش و دمشی برابر با 0.2 را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، در روش مکش جریان، افزایش طول شیار

در ادامه، شکل (۱۷) تاریخچه زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شده استوانه مربعی در روش مکش جریان برای طول شیارهای منتخب $d/D = 0.4$ و $d/D = 1$ در عدد رینولدز $Re = 87.5$ و سرعت مکش برابر با 0.2 را نشان می‌دهد.

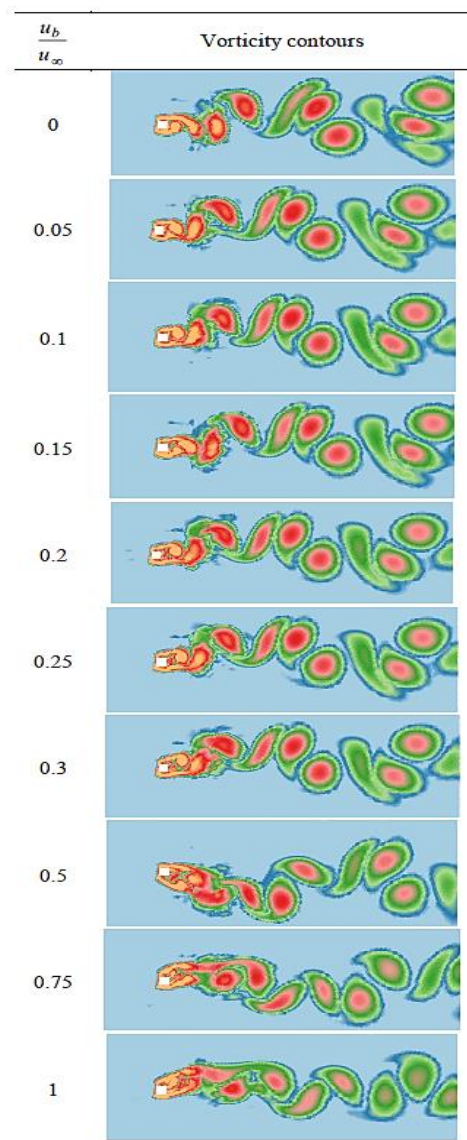


شکل ۱۷ پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شده استوانه مربعی در روش مکش جریان برای طول شیارهای $d/D = 0.4$ و $d/D = 1$ در $Re = 87.5$

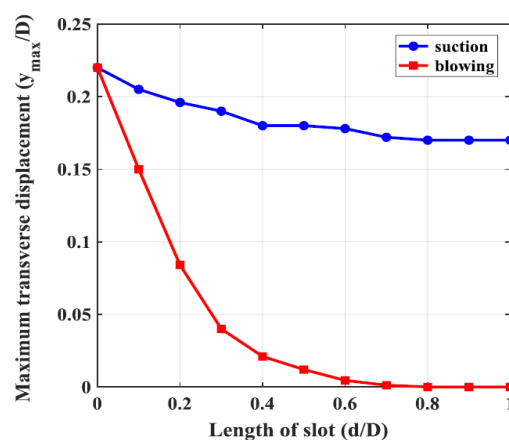


شکل ۱۸ پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شده استوانه مربعی در روش دمش جریان برای طول شیارهای $d/D = 0.2$ و $d/D = 0.7$ در $Re = 87.5$

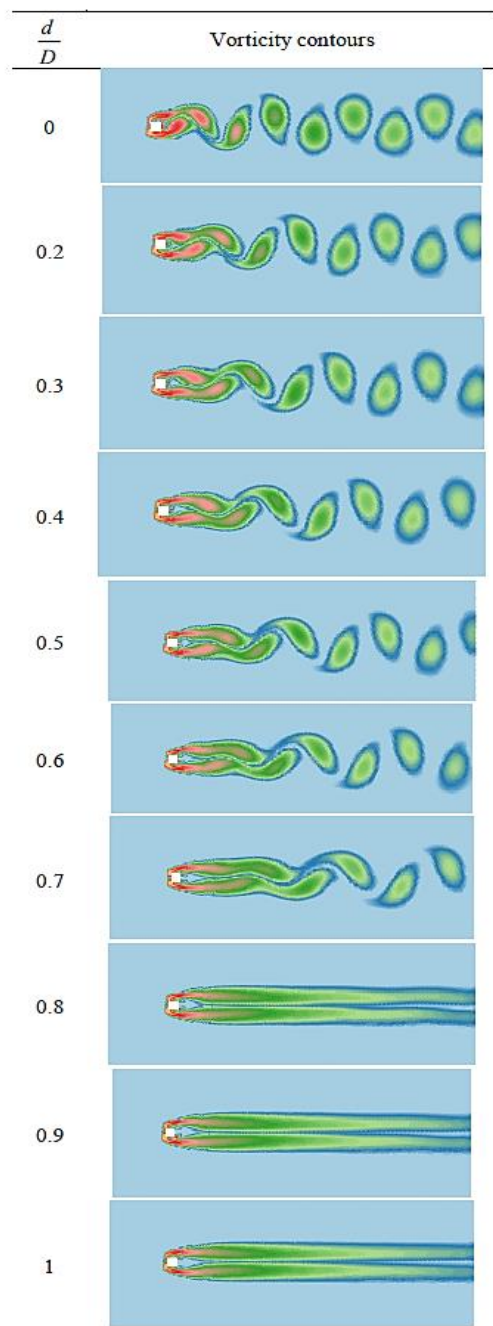
هم‌چنین شکل (۱۸) نمودار مشابه برای روش دمش جریان برای طول شیارهای منتخب $d/D = 0.2$ و $d/D = 0.7$ و سرعت دمش جریان برابر با 0.2 را ارائه می‌دهد. کاهش نه چندان زیاد دامنه ارتعاشات استوانه در روش مکش جریان و هم‌چنین موفقیت روش دمش جریان در این شکل‌ها به‌خوبی مشاهده می‌شود. در ادامه، شکل‌های (۱۹ و ۲۰) تصاویر مربوط به ساختار گردابه‌ای تشکیل شده پشت استوانه مربعی برای $Re = 87.5$ و سرعت مکش/دمش برابر با 0.2 به‌ازای تغییرات طول شیارها به‌ترتیب در روش‌های مکش و دمش جریان را نشان می‌دهند. با توجه به شکل (۱۹) دیده می‌شود که همانند مورد مشابه قبلی (شکل ۹) روش مکش جریان تغییری در



شکل ۱۵ کانورهای ورتیسیتی برای تغییرات سرعت دمش در $Re = 250$



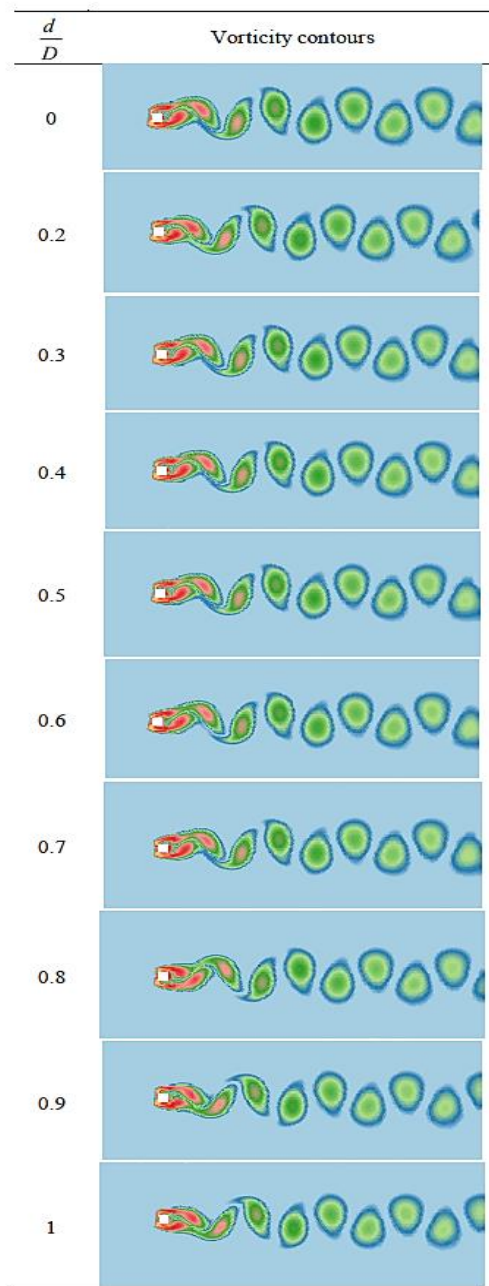
شکل ۱۶ تغییرات بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی بر حسب طول شیارهای دمش و مکش برای $Re = 87.5$



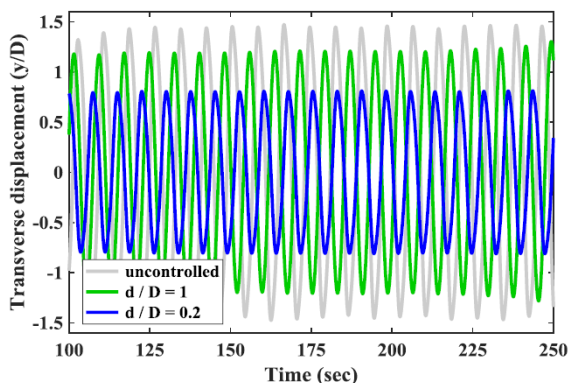
شکل ۲۰ کانتورهای ورتیسیته برای تغییرات طول شیار برای روش دمَش جریان در $Re = 87.5$

شکل (۲۱) تغییرات بیشینه دامنه جابه‌جایی عرضی استوانه مربعی بر حسب تغییرات طول شیارهای مکش و دمَش برای $Re = 250$ و سرعت مکش و دمَش برابر با 0.2 را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در روش مکش جریان، با افزایش طول شیار مکش، بیشینه جابه‌جایی استوانه کاهش پیدا کرده تا جایی که برای $d/D \geq 0.6$ به‌طور کلی دامنه

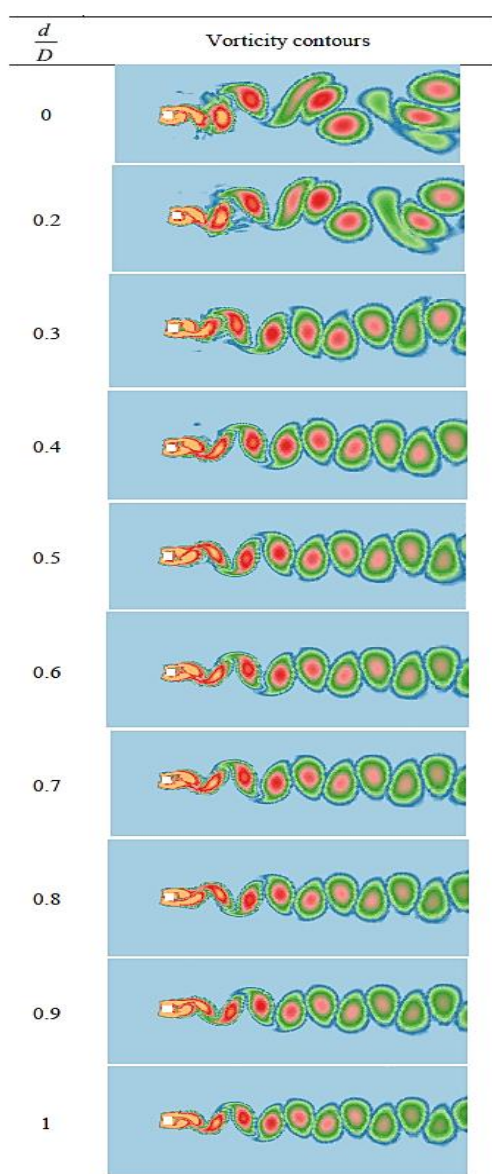
ساختار دنباله گردابه‌ها تشکیل شده پشت استوانه نکرده‌است و هم‌چنان حالت ریزش گردابه‌ها به صورت $2S$ می‌باشد. در نقطه مقابل در شکل (۲۰) مشاهده می‌شود که با بهره‌گیری از روش دمَش جریان، با افزایش طول شیار دمَش، لایه برشی تشکیل شده پشت استوانه کشیده شده و هم‌چنین گردابه‌ها از یکدیگر فاصله گرفته تا جایی که برای نسبت طولی $d/D \geq 0.8$ به‌طور کامل ریزش گردابه‌ها متوقف می‌شود.



شکل ۱۹ کانتورهای ورتیسیته برای تغییرات طول شیار برای روش مکش جریان در $Re = 87.5$



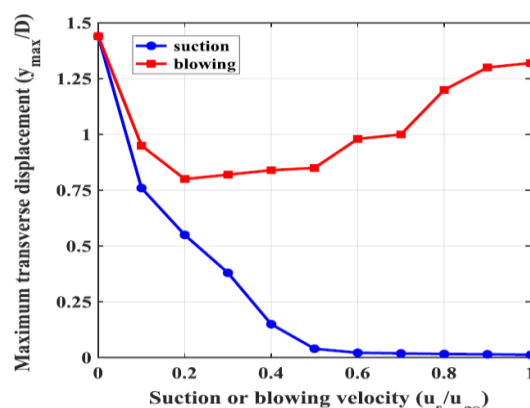
شکل ۲۳ پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شده استوانه مربعی در روش مکش جریان برای طول شیارهای $d/D = 0.2$ و $d/D = 1$ در $Re = 250$



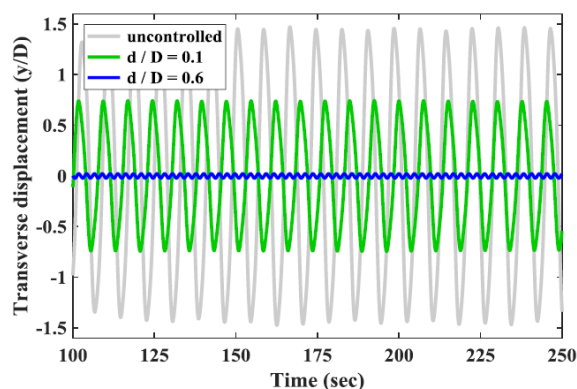
شکل ۲۴ کانتورهای ورتیسیته برای تغییرات طول شیار برای روش مکش جریان در $Re = 250$

گالوپینگ کاهش پیدا می‌کند. در نقطه مقابل دیده می‌شود در روش دمش جریان، با افزایش طول شیار دمش ابتدا دامنه گالوپینگ کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در اینجا نیز، به خوبی برتری روش مکش جریان نسبت به روش دمش برای کاهش گالوپینگ دیده می‌شود. در ادامه، شکل (۲۲) تاریخچه زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شده استوانه مربعی در روش مکش جریان برای طول شیارهای منتخب $d/D = 0.1$ و $d/D = 0.6$ در عدد رینولدز $Re = 250$ و سرعت مکش برابر با 0.6 را نشان می‌دهد. هم‌چنین شکل (۲۳) نمودار مشابه برای روش دمش جریان برای طول شیارهای منتخب $d/D = 0.2$ و $d/D = 1$ و سرعت دمش جریان برابر با 0.2 را ارائه می‌دهد.

با توجه به شکل‌های (۲۲ و ۲۳) نیز به خوبی می‌توان اثربخشی بیشتر روش مکش جریان را در کاهش دامنه گالوپینگ استوانه مربعی مشاهده نمود.



شکل ۲۵ تغییرات بیشینه دامنه جابه‌جایی بی‌بعد شده استوانه مربعی بر حسب طول شیارهای دمش و مکش برای $Re = 250$



شکل ۲۶ پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شده استوانه مربعی در روش مکش جریان برای طول شیارهای $d/D = 0.1$ و $d/D = 0.6$ در $Re = 250$

استوانه را از 2S+2P به حالت 2S تغییر دهد. هم‌چنین در روش دم‌ش جریان تغییری در ساختار گردابه‌ای تشکیل شده پشت استوانه مشاهده نمی‌شود.

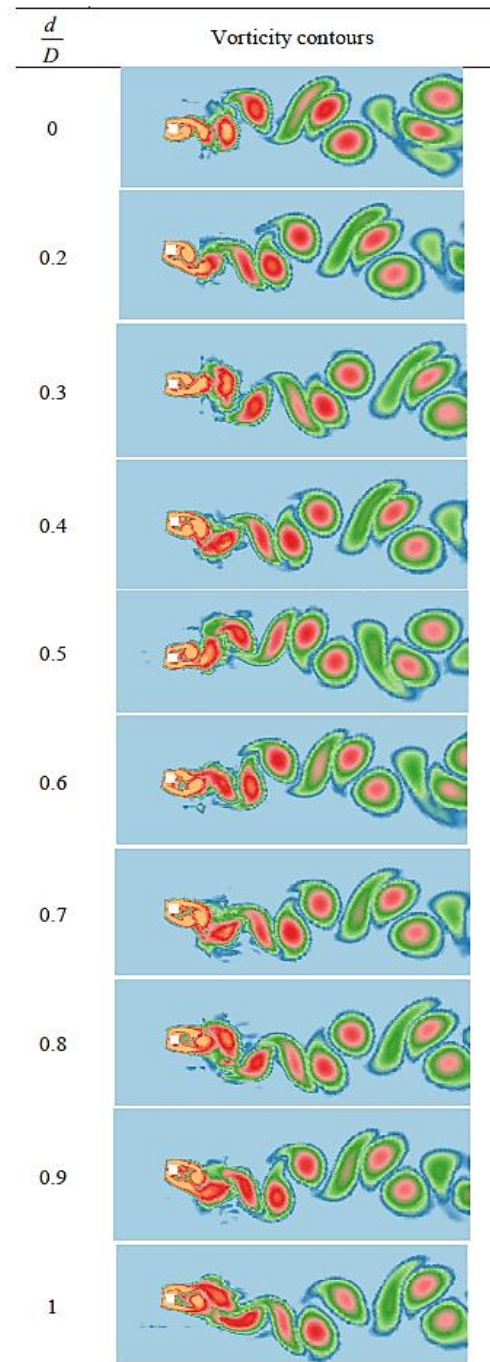
در پایان، خلاصه‌ای از حالت‌های مختلف از پارامترهای کنترلی که در شکل‌های (۷، ۸، ۱۲، ۱۳، ۱۷، ۱۸، ۲۲ و ۲۳) در جدول (۳) خلاصه شده‌است. لازم به ذکر است، درصد‌های کاهش ارتعاشات طبق رابطه $100 \times (y_{uncont} - y_{cont}) / y_{uncont}$ محاسبه می‌شود که در این رابطه y_{uncont} و y_{cont} به ترتیب حداکثر جابه‌جایی استوانه کنترل نشده و حداکثر جابه‌جایی استوانه کنترل شده می‌باشند.

جدول ۳ درصد کاهش ارتعاشات در هر یک از حالت‌های بررسی شده

دمش/مکش	عدد رینولدز	d/D	$u_{s,b}/u_\infty$	درصد کاهش
مکش	۸۷/۵	۰/۵	۰/۲	۳۰٪
دمش			۱	۷۰٪
مکش			۰/۰۵	۴۵٪
دمش			۰/۲	۹۵٪
مکش	۲۵۰		۰/۲۵	۷۱٪
دمش			۰/۵	۹۷٪
مکش			۰/۲	۴۱٪
دمش			۱	۳۱٪
مکش	۸۷/۵	۰/۴	۰/۲	۱۸٪
دمش		۱		۲۸٪
مکش		۰/۲		۶۵٪
دمش		۰/۷		۹۸٪
مکش	۲۵۰	۰/۱		۴۹٪
دمش		۰/۶		۸۷٪
مکش		۰/۲		۴۴٪
دمش		۱		۱۷٪

نتیجه‌گیری

در این مطالعه از روش مکش و دم‌ش جریان برای کاهش نوسانات ناشی از جریان یک استوانه با مقطع مربعی که آزادانه در جهت عرضی نوسان می‌کند برای هر دو ناحیه قفل‌شدگی فرکانسی و گالوپینگ بهره گرفته شده‌است. با توجه به شبیه‌سازی‌های تعامل جریان-سازه‌ای مشاهده می‌شود که در کل



شکل ۲۵ کانتورهای ورتیسیته برای تغییرات طول شیار برای روش دم‌ش جریان در $Re = 250$

در انتها، شکل‌های (۲۴) و (۲۵)، تصاویر مربوط به ساختار گردابه‌ای تشکیل شده پشت استوانه مربعی برای $Re = 250$ به‌ازای تغییرات طول شیارها به ترتیب در روش‌های مکش و دم‌ش جریان را نشان می‌دهند. در این‌جا نیز مشاهده می‌شود که روش مکش جریان می‌تواند حالت ساختار گردابه‌ای تشکیل شده پشت

Fairing	فیرینگ	روش مذکور توانسته است در کاهش دامنه ارتعاشات ناشی از
Flutter	فلاتر	جدایش گردابه‌ها و گالوپینگ موفق عمل کند. برای عدد رینولدز
Galloping	گالوپینگ	واقع در ناحیه قفل‌شدگی فرکانسی ($Re = ۸۷.۵$) مشاهده
Helical strakes	نوارهای مارپیچ	می‌شود که دمش جریان با سرعت مکش $0.2 \geq u_b/u_\infty$ و طول
MDM (Moving/deforming mesh)	مش متحرک	شیار $d/D \geq 0.5$ می‌تواند به مقدار قابل توجهی دامنه ارتعاشات
Non-iterative time advancement	گذشت زمان غیر تکراری	استوانه را کاهش دهد. هم‌چنین دیده می‌شود تحت شرایط گفته
projection error	خطای تصویر	شده، ریزش گردابه‌های تشکیل شده پشت استوانه که در حالت
RMS (Root mean square)	جذر میانگین مربعات	کنترل نشده در ناحیه قفل‌شدگی فرکانسی به صورت $2S$ می‌باشد،
Splitter plate	صفحه‌های جداساز	به‌طور کامل متوقف می‌شود. هم‌چنین برای عدد رینولدز واقع در
Suction or blowing flow control methods	روش کنترل جریانی مکش یا دمش	ناحیه گالوپینگ ($Re = ۲۵۰$) دیده می‌شود که مکش جریان با
UDF (User defined function)	کد تابع کاربر	سرعت مکش $0.8 < u_s/u_\infty < 0.4$ و طول شیار $d/D \geq 0.4$
VIV (Vortex-induced Vibration)	ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه	می‌تواند به مقدار قابل توجهی دامنه گالوپینگ را کاهش دهد.
Vortex shedding	ریزش گردابه‌ها	هم‌چنین مشاهده می‌شود که تحت شرایط ذکر شده، حالت ریزش
		گردابه‌ها از $2S+2P$ (برای استوانه کنترل نشده در ناحیه
		گالوپینگ) به حالت $2S$ تغییر می‌یابد.

واژه نامه

CG Motion

حرکت مرکز گرانش

مراجع

1. Hu, Q., and Ma, G., "Variable Structure Control and Active Vibration Suppression of Flexible Spacecraft During Attitude Maneuver", *Aerospace science and technology*, Vol. 9, Pp. 307-317, (2005).
2. Yun, H., et al., "Investigation on Two-stage Vibration Suppression and Precision Pointing for Space Optical Payloads", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 96, Pp. 105543, (2020).
3. Voss, G., Schaefer, D., and Vidy, C., "Investigation on Flutter Stability of the DLR-F19/SACCON Configuration", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 93, Pp. 105320, (2019).
4. Joly, A., Etienne, S., and Pelletier, D., "Galloping of Square Cylinders in Cross-flow at Low Reynolds Numbers", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 28, Pp. 232-243, (2012).
5. Blanchard, A., Bergman, L.A., and Vakakis, A.F., "Vortex-induced Vibration of a Linearly Sprung Cylinder with an Internal Rotational Nonlinear Energy Sink in Turbulent Flow", *Nonlinear Dynamics*, Vol. 99, Pp. 593-609, (2020).
6. Rabiee, A.H., "Galloping and VIV cControl of Square-Section Cylinder Utilizing Direct Opposing Smart Control Force", *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, Vol. 5, Pp. 69-84, (2019).
7. Zhao, H., and Zhao, M., "Effect of Rounded cCorners on Flow-induced Vibration of a Square Cylinder at a Low Reynolds Number of 200", *Ocean Engineering*, Vol. 188, Pp. 106263, (2019).

8. Kumar, R. A., Sohn, C.-H., and Gowda, B.H., "Passive Control of Vortex-induced Vibrations: An Overview", *Recent Patents on Mechanical Engineering*, Vol. 1, Pp. 1-11, (2008).
9. Rabiee, A. H., and Esmaeili, M., "Simultaneous Vortex-and Wake-induced Vibration Suppression of Tandem-arranged Circular Cylinders Using Active Feedback Control System", *Journal of Sound and Vibration*, Pp. 115131, (2019).
10. Hasheminejad, S. M., Rabiee, A. H., and Bahrami, H., "Active Closed-loop Vortex-induced Vibration Control of an Elastically Mounted Circular Cylinder at Low Reynolds Number Using Feedback Rotary Oscillations", *Acta Mechanica*, Vol. 229, Pp. 231-250, (2018).
11. Fransson, J. H., Konieczny, P., and Alfredsson, P.H., "Flow around a Porous Cylinder Subject to Continuous Suction or Blowing", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 19, Pp. 1031-1048, (2004).
12. Sen, S., and Mittal, S., "Free Vibration of a Square Cylinder at Low Reynolds Numbers", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 27, Pp. 875-884, (2011).

Flow Prediction in Two-Dimensional Asymmetric Diffuser by Neural Network and Comparison with Three Turbulence Models and Experimental Data*

Research Article

Mostafa Zamani Mohiabadi¹ Farid Soltani²

Ahmad Reza Boroomandpour³

Ghanbar Ali Sheikhzadeh⁴

1. Introduction

The study of fluid flow in asymmetric geometries and the expansion of geometry is important from the perspective of the principles of fluid mechanics, because it shows fluid separation and reconnection. The most widely used turbulence models are the standard $k-\epsilon$ model, the standard $k-\omega$ model, and the SST $k-\omega$ model. Neural networks are new computational methods whose main advantage are high speed and optimal accuracy in predicting nonlinear variables. In this research, the numerical solution of turbulent flow in an asymmetric two-dimensional diffuser is investigated to predict flow separation and also compared with neural network model and experimental data.

2. Results

The geometry of the problem shown in Figure 1 consists of an input boundary and an output boundary, and the other boundaries are the walls. The input limit is the input speed condition and the output limit is the zero pressure limit condition. Figure 1 shows the X-direction velocity contour for all three standard $k-\epsilon$ turbulence models, the standard $k-\omega$ model, and the SST $k-\omega$ model, indicating that the flow at the diffuser inlet has the highest velocity. As the fluid flows in the X direction, as the cross section area increases and the pressure increases, the velocity reaches its lowest value (in some places a negative velocity). The negative velocity in the diffuser indicates the separation of the boundary layer. Given that in this study the value of the Reynolds number is 20,000, the $k-\omega$ and SST $k-\omega$ models are more successful near the wall, which is better than the standard $k-\epsilon$ model for high Reynolds numbers.

To perform neural network simulation, measured data at different points of the diffuser were used. 70% of the total data was selected for training, 15% for validation, and 15% for testing. The points x and y/H are considered as inputs and U/U_0 as the output of the neural network. Trial and error procedure was used to determine the optimal number of hidden layers. A structure with the least number of hidden layers with an acceptable degree

of error is selected. The selected 3-layer neural network has the number of neurons. The results of its comparison with other numerical models are given below.

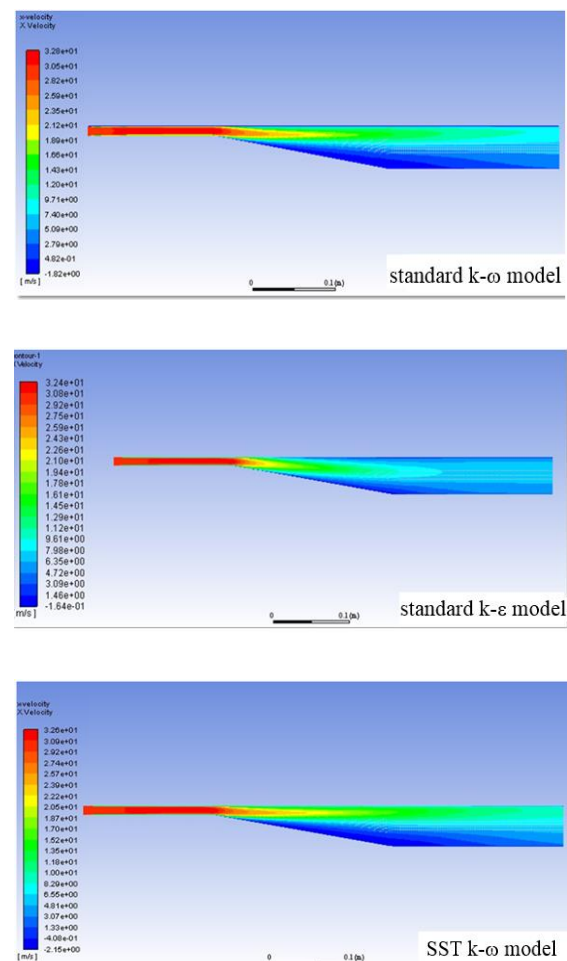


Figure 1. Speed contour in X direction for standard $k-\epsilon$, $k-\omega$, and SST $k-\omega$ models

Figure 2 compares all models with experimental measurements for distances 21, 29, 39 and 49. It is clear that the results of the standard $k-\omega$ and SST $k-\omega$ models are acceptable and the results of the ANN model are very close to the experimental results and the flow separation is predicted more accurately. The standard $k-\epsilon$ model, however, has not been very successful in predicting flow separation.

* Manuscript received: 06 December 2021; Revised, 18 January 2022, Accepted, 01 May 2022.

¹. Corresponding author: Ph. D Student, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

Email: m.zamani@vru.ac.ir

² : Ph. D Student, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

³. Ph. D Student, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran.

⁴ Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

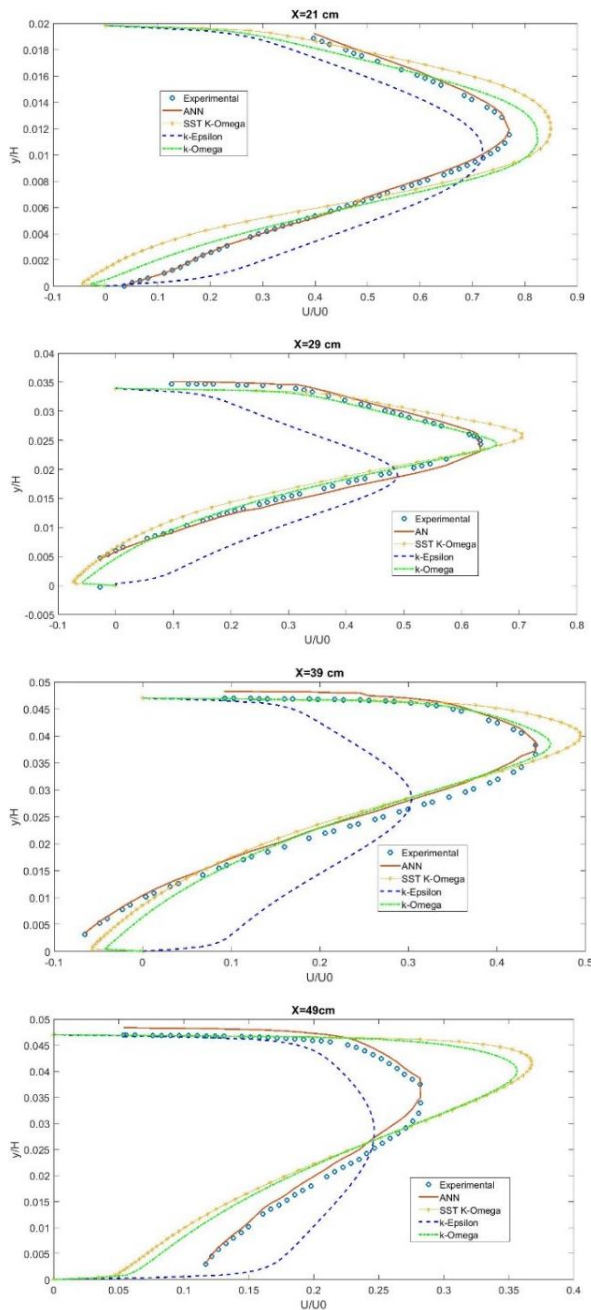


Figure 2. Comparison of models with experimental measurements at distances of 21, 29, 39 and 49 cm from the input edge

To better compare the four models, statistical indicators were used, the results of which are shown in Table 1. As it is clear, the neural network was better than other models for predicting the desired speed.

Table 1. Results of statistical indices of four models used at four points 21, 29, 39 and 49 cm from the input edge

X	ANN		
	t-test	MBE	RMSE
21	7.074	1.5809e-4	2.3443e-4
29	0.4353	-4.8432e-5	8.6319 e-4
39	20.1431	0.0011	0.0012
49	23.3591	0.0014	0.0015
X	Standard K-ε		
	t-test	MBE	RMSE
21	16.7101	0.429	0.4729
29	12.3457	0.2279	0.269
39	16.9097	0.158	0.1738
49	27.994	0.1655	0.1717
X	Standard k-ω		
	t-test	MBE	RMSE
21	11.3655	0.4132	0.5
29	7.5805	0.2408	0.3443
39	7.7266	0.1697	0.2403
49	13.3088	0.1679	0.1964
X	SST k-ω		
	t-test	MBE	RMSE
21	10.1581	0.4136	0.5201
29	6.8506	0.2464	0.3719
39	6.9944	0.1727	0.2577
49	12.2662	0.171	0.2022

3. Conclusion

In this study, to predict the flow separation in an asymmetric two-dimensional diffuser, three turbulence models standard k-ε, standard k-ω, and SST k-ω and intelligent neural network model were investigated. To test the independence of the network, the standard turbulence model k-ε is used. The asymmetric two-dimensional diffuser was studied using the second type of networking, Mesh B. In this research, the value of Reynolds number is 20,000. The flow enters the diffuser with an input speed of 29.21 meters per second. Due to the Reynolds number value as well as the reported shapes, the k-ω and SST k-ω models have been more successful near the wall. In this study, a 3-layer neural network model was selected which has the number of neurons [5 6 7]. The results of the standard k-ω and SST k-ω models are acceptable and the results of the ANN model are very close to the experimental results and the flow separation is predicted more accurately, but the standard k-ε model has not been very successful in predicting flow separation. Statistical indices of RMSE, MBE and t-test for all the four models were also calculated and compared, which also indicates this issue.

پیش‌بینی جریان در دیفیوزر نامتقارن دو بعدی توسط شبکه عصبی و مقایسه نتایج با سه مدل آشفتگی و داده‌های تجربی*

مصطفی زمانی محی‌آبادی^(۱) فرید سلطانی^(۲) احمدرضا برومندپور^(۳) قنبرعلی شیخ زاده^(۴)

چکیده در کار حاضر جریان آشفتنه در یک دیفیوزر دو بعدی نامتقارن مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در بسیاری از کاربردها، اطلاع از این‌که آیا لایه مرزی از سطح یا داخل یک جسم خاص جدا می‌شود و این‌که دقیقاً جدا سازی جریان در کجا رخ می‌دهد، از اهمیت خاصی برخوردار است. ترکیب داده‌های آشفتگی با هوش مصنوعی در حال حاضر یک موضوع تحقیقاتی فعال برای مطالعه آشفتگی است. در این مقاله پیش‌بینی جدایش جریان با وجود گرادیان فشار معکوس در دیفیوزر دو بعدی نامتقارن، با استفاده از سه مدل آشفتگی شامل مدل استاندارد $k-\epsilon$ ، مدل استاندارد $k-\omega$ و مدل $SST\ k-\omega$ و مدل هوشمند شبکه عصبی مصنوعی (ANN) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی عددی و حل معادلات حاکم از نرم افزار فلوئنت استفاده شده است. نتایج در فواصل ۲۱، ۲۹، ۳۹ و ۴۹ سانتی متری از لبه دیفیوزر مورد تحلیل قرار گرفتند و با داده‌های تجربی مقایسه شدند. x و y/H هر نقطه به عنوان ورودی و U/U_0 سرعت در آن نقطه به عنوان خروجی شبکه عصبی در نظر گرفته شده است. شاخص‌های آماری $RMSE$ ، MBE ، t -test برای نقاط مورد نظر محاسبه و گزارش شده است. مدل شبکه مصنوعی نسبت به سه مدل آشفتگی، پیش‌بینی بهتری از جدایش جریان را نشان می‌دهد و مدل استاندارد $k-\epsilon$ نسبت به مدل‌های دیگر پیش‌بینی ضعیف‌تری را نشان می‌دهد. این تحقیق چشم‌انداز مدل‌سازی آشفتگی را با روش‌های یادگیری ماشین به خصوص شبکه عصبی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی دیفیوزر، مدل آشفتگی، شبکه عصبی.

مقدمه

با پیشرفت کامپیوترها شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده به وسیله حل توأمان معادلات دیفرانسیل پاره‌ای مومنتوم، پیوستگی و بقای انرژی امکان پذیر شده است. جدایش جریان به دلیل وجود گرادیان فشار معکوس در جریان‌های داخلی و خارجی اتفاق می‌افتد. در بسیاری از مسائل وقوع جدایش جریان و محل دقیق آن از اهمیت زیادی برخوردار است. بررسی جریان سیال در هندسه‌های نامتقارن و انبساط هندسه به دلیل نشان دادن جدایش سیال و اتصال مجدد، از منظر مبانی مکانیک سیالات دارای اهمیت است. استفاده از معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) RANS که در شبیه‌سازی‌های سیالاتی بسیار پرکاربرد است، برای محاسبه تنش رینولدز به یک مدل آشفتگی نیاز دارند. تاکنون مدل‌های آشفتگی مختلفی معرفی شده است [1]. این مدل‌ها شامل معادلات ساده ویسکوزیته آشفتنه تا معادلات دقیق‌تر می‌باشند [2]. از پرکاربردترین مدل‌های آشفتگی می‌توان به مدل $k-\omega$ استاندارد،

مدل $RNG\ k-\omega$ ، مدل استاندارد $k-\omega$ و مدل $SST\ k-\omega$ (Shear-)

Stress Transport) اشاره کرد [3-8].

کالتنباخ و همکاران [9] جریان در دیفیوزرهای نامتقارن صفحه‌ای را با روش عددی و توسط مدل LES (Large Eddy Simulation) مورد بررسی قرار داده‌اند.

مالیکو و همکاران [10] یک مطالعه عددی از ساختار جریان از طریق دیفیوزرهای دو بعدی متقارن محوری را ارائه کردند. محاسبات آن‌ها بر اساس حل سیستم معادلات غیرایستا مدل تلاطم مالیکوف دو سیال انجام شده است. پروفیل‌های سرعت طولی در مقاطع مختلف کانال مورد بررسی قرار گرفت و چگونه تأثیر تغییرات شبکه بر نتایج نشان داده شد. صحت نتایج آن‌ها برای عدد رینولدز $Re=20000$ تأیید شد. مقایسه نشان داد که مدل جدید قادر است جریان‌های جدا شده را با دقت بالایی پیش‌بینی کند.

هم‌چنین بویس و ایتون [11] به روش تجربی این جریان را مورد بررسی قرار داده‌اند. داده‌های تجربی بویس و ایتون [11]

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۹/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۲/۱۱ می‌باشد.

Email: m.zamani@vru.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

(۲) دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

(۳) دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، خمینی شهر، ایران

(۴) استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

آموزشی در اعداد مختلف رینولدز متفاوت است. افزایش پیش‌بینی مدل مبتنی بر داده و هم‌چنین محدودیت‌های احتمالی مرتبط برای ویژگی‌های جریان مورد علاقه مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت این چارچوب امکان اندازه‌گیری کمی اطمینان مدل و کمی‌سازی عدم قطعیت را برای جریان‌هایی فراهم می‌کند که در آن مشاهدات با وفاداری بالا یا دانش قبلی در دسترس نیست.

لینانگ و همکاران [15] بر جریان‌های گذشته از ایرفویل‌ها با اعداد رینولدز بالا تمرکز کرده‌اند. آن‌ها یک مدل آشفتگی برای جریان‌ها در تعداد ماخ مختلف و زوایای حمله (AOA) با عدد رینولدز ثابت ایجاد کرده و به نتایج رضایت‌بخشی دست یافته‌اند. با این وجود، برای آشفتگی با اعداد رینولدز متغیر، با افزایش داده‌ها توانایی تعمیم مدل به‌طور مؤثر افزایش نمی‌یابد. برای مدل‌سازی غیرخطی بودن اثرات متلاطم مختلف در تعداد رینولدز بالا، دانش قبلی در مورد تجزیه و تحلیل مقیاس‌بندی در طراحی مدل ادغام کردند و شبکه‌های عصبی به‌عنوان چارچوب مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به ویژگی‌های مختلف مقیاس‌بندی، میدان جریان به مناطق مختلف تقسیم شده و دو مدل ANN مجزا به‌طور جداگانه ساختند. علاوه بر این، ترکیبی از منظم‌سازی، محدودکننده‌ها و آموزش پایداری برای افزایش استحکام مدل پیشنهادی اتخاذ شده‌است. آن‌ها از نتایج مدل SA (Spallart-Allmaras) به‌عنوان مجموعه داده و مرجع ارزیابی مدل‌سازی استفاده کردند. مدل پیشنهادی آن‌ها با شش جریان در اطراف ایرفویل NACA0012 آموزش داده شد که برای شرایط جریان آزاد و ایرفویل‌های مختلف کاربرد دارد. از مقایسه نتایج محاسبه‌شده توسط مدل‌های پیشنهادی، مانند ویسکوزیته گردابی، پروفیل سرعت، ضریب پسا و غیره، با داده‌های مرجع موفقیت مدل را در پیش‌بینی نشان دادند.

پیش‌بینی توان مزرعه بادی معمولاً توسط مدل‌های ویک (Wake) تحلیلی پیاده‌سازی می‌شود، که کم‌هزینه است اما از نظر دقت برای مدل‌سازی آشفته بالا کافی نیست. زیلونگ و همکاران [16] یک مدل مبتنی بر یادگیری ماشین جدید برای بهبود پیش‌بینی توان مزارع بادی توسعه داده‌اند. مدل ارائه‌شده می‌تواند میدان‌های سرعت و آشفتگی را در پیک‌های توربین متناسب با شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با دقت بالا و در عین حال به کارایی محاسباتی خوبی دست یابد. با هدایت داده‌های شبیه‌سازی CFD، رابطه ضمنی بین جریان‌های ورودی و جریان‌های Wake با استفاده از تکنیک شبکه‌های عصبی

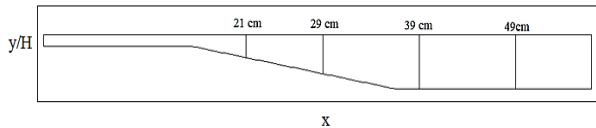
برای پروفیل سرعت متوسط سازگاری مناسبی را با نتایج به‌دست آمده از مدل LES نشان می‌دهد. هم‌چنین پیش‌بینی محل جدایش در روش تجربی و روش LES سازگاری مناسبی داشت ولی اختلافاتی در محل نقطه اتصال مجدد مشاهده شد.

پریانچی و همکاران [12] در مطالعه تجربی، توزیع سرعت، ضریب بازیابی فشار، شدت تلاطم و تفکیک جریان یک دیفیوزر با ورودی هشت ضلعی و خروجی مربع در تونل باد عمودی را بررسی کردند. آزمایش‌ها در دو حالت مکش و جریان دمشی انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که افت فشار و جدایی معنی‌داری در دیفیوزر مورد مطالعه وجود ندارد.

شبکه‌های عصبی از روش‌های محاسباتی جدید می‌باشند که مزیت اصلی آن‌ها سرعت بالا و دقت مطلوب در پیش‌بینی متغیرهای غیرخطی است. شبکه‌های عصبی در حل مسایل پیچیده که مدل‌های تجربی یا نیمه‌تجربی در حل آن‌ها کارایی مناسبی نداشته باشند بسیار کارا هستند. در ادامه چندین کار پژوهشی که در آن‌ها از مدل‌های آشفتگی و مقایسه با شبکه عصبی استفاده شده، ذکر خواهد شد.

لینگ و همکاران [13] روشی برای استفاده از شبکه‌های عصبی برای یادگیری مدلی برای تانسور ناهمسان‌گردی تنش رینولدز از داده‌های شبیه‌سازی با وفاداری بالا ارائه می‌کند. آن‌ها یک معماری شبکه عصبی جدید پیشنهاد داده‌اند که از یک لایه ضربی با پایه تانسور ثابت برای تعبیه تغییر ناپذیری گالیله در تانسور ناهمسان‌گردی پیش‌بینی شده استفاده می‌کند. آن‌ها پیش‌بینی‌های ناهمسان‌گردی تنش رینولدز این شبکه عصبی ثابت از طریق میدان سرعت برای دو مورد آزمایشی منتشر کردند برای هر دو مورد آزمایش، بهبود قابل توجهی در مقایسه با مدل‌های ویسکوزیته گردابی خطی و غیرخطی RANS نشان دادند.

گنوا و همکاران [14] یک چارچوب جدید مبتنی بر داده را پیشنهاد کردند که نه تنها پیش‌بینی‌های RANS را بهبود می‌بخشد، بلکه محدودیت‌های احتمالی برای مقادیر سیال مانند سرعت و فشار را نیز فراهم می‌کند. ضبط عدم قطعیت‌ها شامل عدم قطعیت فرم مدل و هم‌چنین عدم قطعیت معرفتی ناشی از داده‌های آموزشی محدود است. آن‌ها از یک مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی مؤلفه تانسور ناهمسان‌گرد تنش رینولدز استفاده کردند. این مدل با استفاده از الگوریتم گرادینان متغیر استاین آموزش داده شده‌است. عدم قطعیت محاسبه‌شده در تنش رینولدز با شبیه‌سازی مونت کارلو وانیلی به مقادیر مورد نظر منتشر شد. نتایج برای دو مورد آزمایشی ارائه شده‌است که از نظر هندسی با جریان‌های



شکل ۲ حوزه حل محاسباتی

معادلات حاکم و مدل‌های آشفتگی موردنظر

برای حل جریان از معادلات ناویر استوکس رینولدز متوسط استفاده می‌شود. معادلات پیوستگی و ناویراستوکس برای یک جریان دائم در مختصات کارتزین به صورت زیر تعریف می‌شود [18].

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

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

در این تحقیق از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، $k-\omega$ استاندارد و SST $k-\omega$ برای پیش‌بینی جدایش جریان استفاده شده است. مدل‌های آشفتگی از تقریب بوزینسک برای برقراری ارتباط بین تنش‌های رینولدز و گرادیان‌های سرعت متوسط استفاده می‌کند [18].

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

مدل استاندارد $k-\epsilon$ معروف‌ترین و متداول‌ترین مدل آشفتگی برای کاربردهای صنعتی است. در صورتی که مدل استاندارد $k-\epsilon$ همراه رابطه بوزینسک به کار برده شود، برای طیف وسیعی از مسائل مهندسی پیچیده جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌نماید. اما برای مسائلی که شامل غیر ایزوتروپ‌های شدید جریان و نیز اثرات غیر تعادلی هستند، این مدل در نهایت به جواب‌هایی خواهد رسید که تا حدودی فوق دیفیوز است، یعنی مقادیر μ_t که توسط این مدل پیش‌بینی می‌شود، تا حدی بزرگ خواهند بود [18].

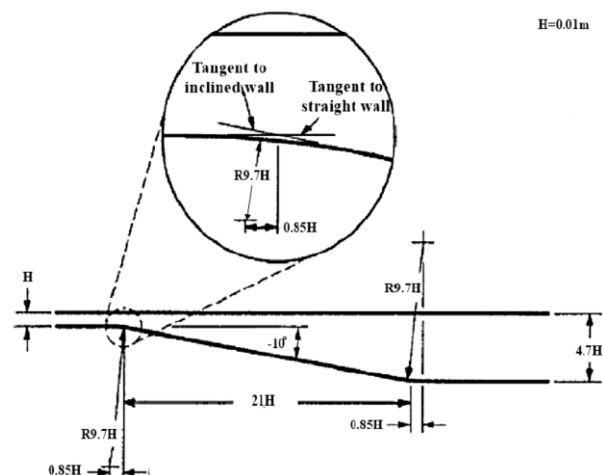
مدل‌های $k-\omega$ محبوبیت زیادی دارند زیرا دارای قدرت زیادی در هنگام انتگرال‌گیری از معادلات به سمت دیواره می‌باشد. از همین رو دیگر نیازی به استفاده از توابع دیواره تجربی نبوده یا آن‌که نیاز کمتری به استفاده از این توابع وجود دارد. همچنین مدل $k-\omega$ نسبت به مدل $k-\epsilon$ در جریان‌هایی که

مصنوعی (ANN) بر اساس الگوریتم پس انتشار ایجاد شد. آن‌ها روش مرتبه کاهش یافته مدل دیسک محرک با چرخش (ADM-R) و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ اصلاح شده برای ذخیره محاسباتی در شبیه‌سازی‌های RANS پیاده‌سازی شده است. نتیجه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که مدل ANN می‌تواند پیش‌بینی‌های توان را در مقایسه با مدل‌های تحلیلی موجود به طور محسوسی بهبود بخشد و به خوبی با LES و داده‌های اندازه‌گیری مطابقت دهد.

در ادامه این مقاله در ابتدا مدل‌های آشفتگی موردنظر توضیح داده شده و سپس جریان در دیفیوزر نامتقارن توسط این مدل‌های آشفتگی شبیه‌سازی و عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. از شبکه‌های عصبی هوشمند به عنوان نوآوری در این مسئله مورد استفاده قرار گرفته است که ادامه آن در ابتدا شبکه عصبی بررسی شده و مسئله موردنظر توسط ANN مدل‌سازی و شبیه‌سازی گردیده است در نهایت نتایج به دست آمده از چهار مدل موجود با یکدیگر و داده‌های تجربی مقایسه شد.

تعریف و فرمول‌بندی مسئله

در این تحقیق حل عددی جریان آشفتگی در یک دیفیوزر دو بعدی برای پیش‌بینی جدایش جریان بررسی شد. بسته نرم‌افزاری فلوئنت برای پیش‌بینی جدایش جریان و انتخاب بهترین مدل توربولانسی جهت ارزیابی رفتار جریان مورد استفاده قرار گرفته است. روش عددی به کار رفته مبتنی بر روش حجم محدود می‌باشد که نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در شکل (۱) هندسه مورد مطالعه و در شکل (۲) حوزه حل محاسباتی نشان داده شده است.



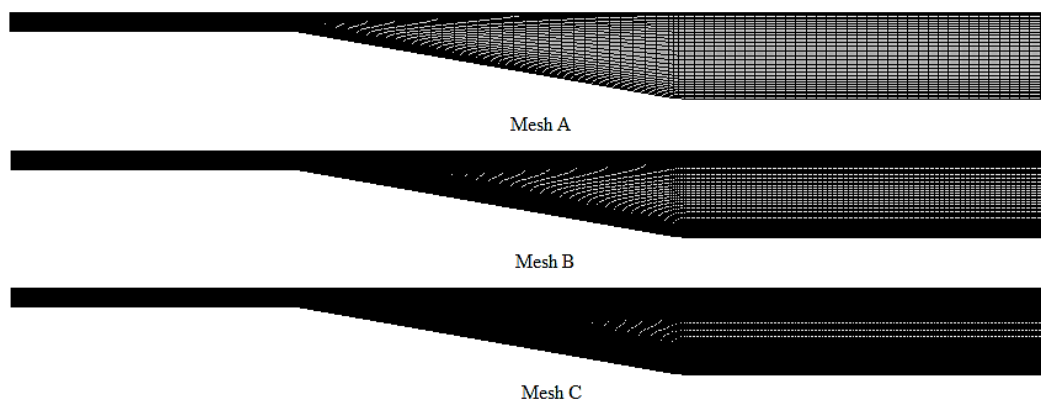
شکل ۱ طرح شماتیکی دیفیوزر [11,17]

شبکه یا تولید مش

دقت هر شبیه‌سازی به شدت وابسته به کیفیت شبکه است. در صورت بالا بودن کیفیت شبکه، منجر به هم‌گرایی سریع‌تر می‌شود. در این تحقیق روشی ساده برای شبکه‌بندی استفاده شده‌است. در شکل (۳) و جدول (۱) مدل و مشخصات شبکه-بندی نشان داده شده‌است.

جهت شبکه‌بندی دیفیوزر موجود، دیواره افقی براساس تغییر مقطع به پنج قسمت تقسیم شده و برای هر قسمت تعداد شبکه مشخصی در نظر گرفته شده‌است. برای دیواره‌های عمودی تعداد یکسانی از شبکه برای همه مقاطع در نظر گرفته شده‌است.

شامل کاهش سرعت و جدایش ناشی از گرادیان فشار معکوس می‌باشند، بهتر عمل می‌کند. اغلب مدل‌های $k-\varepsilon$ از آن‌جا که از فرضیات رینولدز بالا جریان استفاده می‌کنند، برای حل معادلات در نواحی نزدیک دیواره با مشکلات زیادی مواجه می‌شوند. اما مدل $k-\omega$ را می‌توان برای پیش‌بینی تغییرات متغیرهای توربولانس تا لبه دیواره‌های جامد مورد استفاده قرار داد [18]. مدل SST $k-\omega$ توسط منتر و به منظور آمیختن فرمول‌بندی دقیق و قدرتمند مدل $k-\omega$ در نواحی نزدیک دیواره با مدل $k-\varepsilon$ مستعمل از جریان‌های آزاد در نواحی دور از دیواره ارائه شده‌است. یعنی مدل به‌طور هم‌زمان توانایی بالای مدل $k-\omega$ در نواحی با عدد رینولدز پایین و توانایی بالای مدل $k-\varepsilon$ در نواحی با عدد رینولدز بالا را در اختیار گرفته‌است [18].



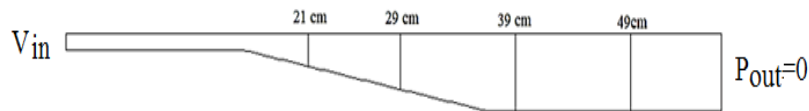
شکل ۳ مدل شبکه تولید شده

جدول ۱ مشخصات شبکه تولید شده

شبکه	تعداد کل سلول‌ها	دیوار عمودی	دیوار افقی پایینی	دیوار افقی بالایی
A	30 × 100	۳۰۰۰	۳۰	27,3,31,3,36
B	60 × 200	۱۲۰۰۰	۶۰	54,6,62,6,72
C	90 × 300	۲۷۰۰۰	۹۰	81,9,93,9,108

جدول ۲ کیفیت شبکه‌بندی

شبکه	Aspect Ratio Maximum	Minimum Orthogonal Quality	Skewness Maximum
30 × 100	$3.26 \times 10^{+1}$	8.1×10^{-1}	1.11×10^{-1}
60 × 200	$3.33 \times 10^{+1}$	9.07×10^{-1}	$1.11 \times 10^{+1}$
90 × 300	$3.35 \times 10^{+1}$	9.38×10^{-1}	$1.11 \times 10^{+1}$



شکل ۴ شرایط مرزی استفاده شده

بررسی استقلال شبکه

در حل مسائل به روش عددی بررسی استقلال حل از شبکه از اهمیت به سزایی برخوردار است. به این منظور در چند شبکه مختلف و با اندازه‌های مختلف شبیه‌سازی انجام می‌شود و بر اساس نتایج به دست آمده، یکی از متغیرهای وابسته مقایسه می‌شود. برای دو شبکه که نتایج به دست آمده مطابقت داشته باشد، به منظور صرفه‌جویی در منابع و زمان حل، از شبکه بزرگ‌تر استفاده می‌شود. یکی از متغیرهای کاربردی در استقلال حل از شبکه متغیر وابسته y^+ است. با کاهش ابعاد شبکه متغیر y^+ نیز کاهش می‌یابد. y^+ یک متغیر بدون بعد برای جریان‌های محدود به دیواره است که در تئوری لایه مرزی و قانون دیواره استفاده می‌شود و به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$y^+ = \frac{u \times y}{\nu} \quad (4)$$

در این تحقیق برای بررسی استقلال از شبکه از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شده است. به این منظور نتایج به دست آمده برای متغیر y^+ در دو مقطع از هندسه برای سه شبکه با ابعاد مختلف مقایسه شده است. جدول (۳) نشان می‌دهد که نتایج y^+ به دست آمده از شبکه‌های B و C بسیار نزدیک هستند. در صورت انتخاب شبکه C به دلیل ریزتر بودن نسبت به شبکه B حجم محاسبات افزایش پیدا می‌کند در صورتی که باید به دنبال راهکاری بود که هزینه محاسباتی کاهش پیدا کند، بنابراین شبکه B برای حل مسئله توسط سایر مدل‌های آشفتگی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۳ مقادیر y^+ مربوط به شبکه‌بندی‌های مختلف

شبکه	مقدار y^+
شبکه A	۸,۴
شبکه B	۵,۳
شبکه C	۲,۱

کیفیت شبکه بندی. بررسی کیفیت شبکه قبل از محاسبات یک روش مناسب جهت رسیدن به نتایج مطلوب است. در جدول (۲) به مهم‌ترین مواردی که نقش اصلی در کیفیت شبکه بندی دارند اشاره شده است. پارامتر Aspect ratio نسبت ضلع بزرگ‌تر به ضلع کوچک‌تر را بیان می‌کند، پارامتر orthogonal quality در محیط مش کیفیت مش را نشان می‌دهد. این گزینه نشان دهنده زاویه گیری یک سلول به سلول مجاور است. هر چه میزان این عدد به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده کیفیت بیشتر مش است. Skewness این معیار بین صفر تا یک قرار داشته که برای این که یک شبکه از کیفیت بالایی برخوردار باشد این پارامتر باید به عدد صفر نزدیک‌تر باشد.

شرایط مرزی

با توجه به هندسه مسئله که در شکل (۲) نشان داده شده است، شامل یک مرز ورودی و یک مرز خروجی است و سایر مرزها را دیواره‌ها تشکیل می‌دهند. مرز ورودی از شرط سرعت ورودی و در مرز خروجی از شرط مرزی فشار صفر استفاده شده است (شکل ۴).

راهبرد حل و هم گرایی

از شیوه گسسته سازی بالادست مرتبه دوم برای معادلات ممتنم و کمیت‌های توربولانسی استفاده شده است. برای برقراری ارتباط بین میدان‌های سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است [19].

بحث و نتایج

به منظور شناسایی بهترین روش حل عددی جریان آشفته درون دیفیوزر دو بعدی، سه کیفیت شبکه متفاوت با استفاده از نرم افزار تجاری فلوئنت به شیوه حجم محدود حل و نتایج زیر حاصل شدند.

بررسی عملکرد مدل‌های آشفتگی

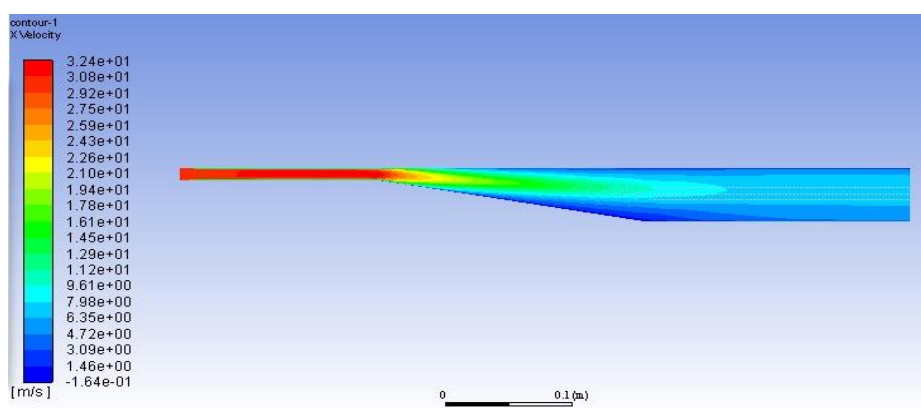
در این مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد، $k-\omega$ استاندارد و SST $k-\omega$ به‌منظور پیش‌بینی جدایش جریان مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

زمانی که هوا وارد بخش انبساطی دیفیوزر می‌شود به‌دلیل وجود گرادیان فشار معکوس، جدایش جریان رخ داده و ناحیه چرخش مجدد به وجود می‌آید.

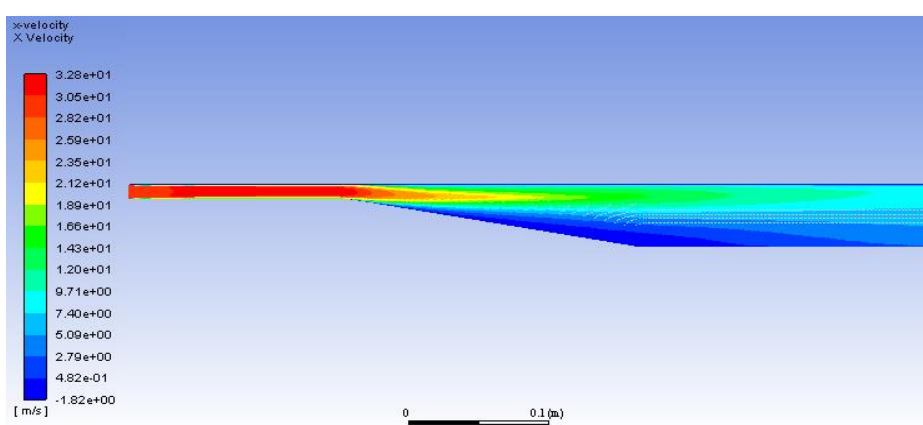
دیفیوزر دوبعدی نامتقارن با استفاده از شبکه‌بندی نوع دوم یعنی Mesh B با سه مدل $k-\varepsilon$ استاندارد، مدل $k-\omega$ استاندارد و مدل SST $k-\omega$ مورد مطالعه قرار گرفته‌است.

در شکل‌های (۵) تا (۷) کانتور سرعت در جهت X برای هر سه مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد، مدل $k-\omega$ استاندارد و مدل

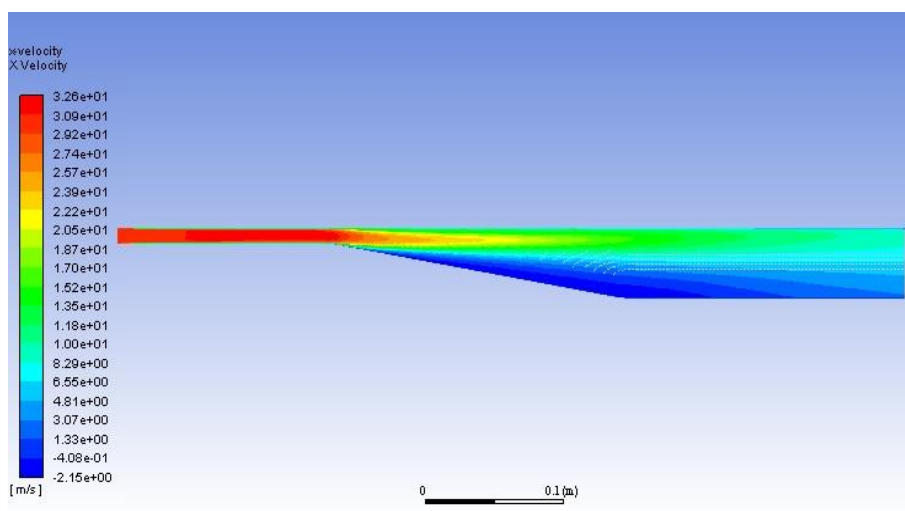
SST $k-\omega$ نشان داده شده‌است که نشان می‌دهد در ورودی دیفیوزر جریان دارای بیشترین سرعت است. هر چه جریان در جهت X پیش می‌رود با بیشتر شدن سطح و افزایش فشار، سرعت به کمترین مقدار خود (در بعضی نقاط به سرعت منفی) می‌رسد. سرعت منفی در دیفیوزر نشان دهنده جدایش لایه مرزی است. با توجه به این‌که در این تحقیق مقدار عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ می‌باشد جریان با سرعت ورودی ۲۹/۲۱ متر بر ثانیه وارد دیفیوزر می‌شود. با توجه به مقدار عدد رینولدز و هم‌چنین شکل‌های (۵) تا (۷) نشان داده شده‌است که مدل $k-\omega$ و SST $k-\omega$ در نزدیک دیواره موفق‌تر عمل می‌کند که در مقابل مدل استاندارد $k-\varepsilon$ برای مقادیر اعداد رینولدز بالا عملکرد بهتری دارد.



شکل ۵ کانتور سرعت در جهت X برای مدل استاندارد $k-\varepsilon$



شکل ۶ کانتور سرعت در جهت X برای مدل استاندارد $\omega-k$



شکل ۷ کانتور سرعت در جهت X برای مدل ω -SST k

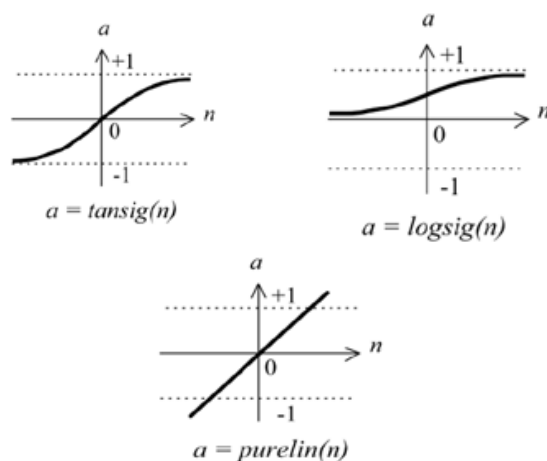
وزن‌های اتصالی بین نوروها به دست می‌آید.

مدل‌سازی صورت گرفته با شبکه عصبی

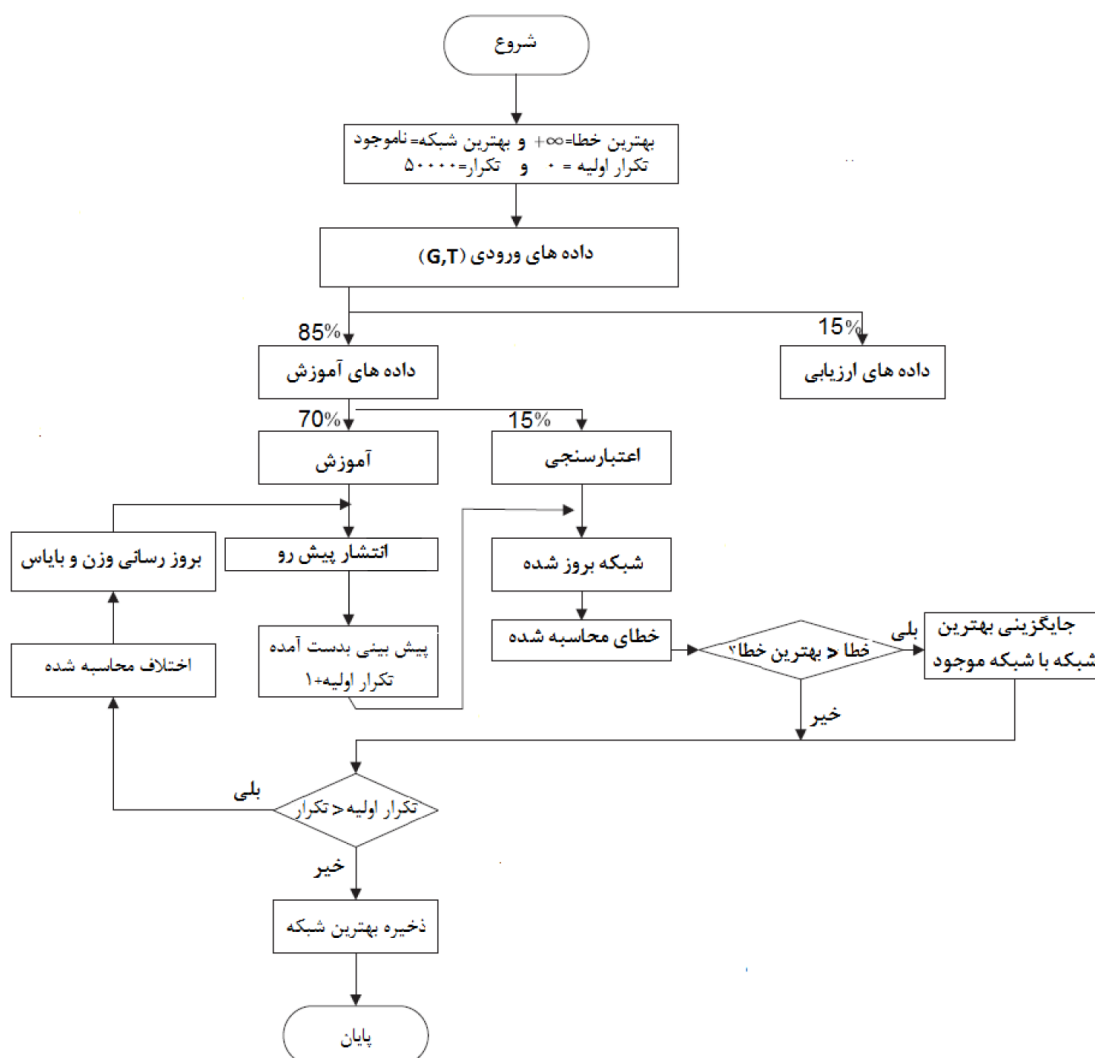
به‌طور کلی مدل‌سازی یکی از ابزارهای مناسب برای تصمیم‌گیری و پیش‌بینی پدیده‌های محیط زیستی و طبیعی می‌باشد که اغلب به‌صورت مدل‌های مفهومی با روابط ریاضی بیان می‌شوند. تبدیل یک مفهوم آماری به زبان ریاضی، نوعی از مدل‌سازی است. از طریق مدل‌سازی می‌توان شرایط و موقعیت‌های خاص را به‌صورت مجازی ایجاد و آن را مورد آزمون قرار داده و تحلیل کرد. جهت انجام آنالیز باید تمامی شرایط یکسان در نظر گرفته شود. این شرایط عبارتند از تعداد لایه‌ها و نرون‌های هر لایه و نوع توابع انتقال شبکه عصبی می‌باشد. انتخاب تابع انتقال تأثیر به‌سزایی بر دقت خروجی شبکه عصبی می‌گذارد. معمولاً سه تابع انتقال اصلی برای مدل‌سازی شبکه عصبی وجود دارد که شامل توابع سیگموئید تانژانت ($\text{Tangent sigmoid (Tansig)}$)، سیگموئید لگاریتمی ($\text{Log sigmoid (Logsig)}$) و سیگموئید خطی (Purelin) (sigmoid (Purelin)) می‌باشند (شکل ۸) [23]. برای تعیین بهترین ترکیب از توابع انتقال در شبکه با یک یا دو لایه نهان، توابع انتقال مختلفی برای توسعه شبکه استفاده می‌شود. بررسی نتایج آنالیز توسط شاخص‌های آماری صورت می‌گیرد که در ادامه توضیح داده شده‌است. شکل (۹) فلوچارت شبکه عصبی و نحوه هم‌گرایی آن را نشان می‌دهد.

شبکه‌های عصبی

شبکه‌های عصبی از روش‌های محاسباتی جدید می‌باشند که مزیت اصلی آن‌ها سرعت بالا و دقت مطلوب در پیش‌بینی متغیرهای غیرخطی است. شبکه‌های عصبی در حل مسایل پیچیده که مدل‌های تجربی یا نیمه‌تجربی در حل آن‌ها کارایی مناسبی نداشته باشند بسیار کارا هستند [20-22]. شبکه‌های عصبی مصنوعی نوعی مدل آماری است که بر اساس کارکرد مغز انسان طراحی شده‌است. این نوع مدل می‌تواند ورودی‌های معینی را دریافت کند و طی یک سری پردازش‌های موجود در مدل، نتیجه مطلوب را ارائه دهد. شبکه‌های عصبی از واحدهای ساده‌ای به نام نرون ساخته می‌شوند و سلول‌هایی نظیر آن‌چه که در مغز انسان وجود دارد را ارائه می‌دهند. در یک شبکه، نوروها به‌وسیله اتصالات وزنی به یکدیگر متصل می‌شوند. از طریق تنظیم این وزن‌ها، فرآیند آموزش درون شبکه به دست می‌آید. شبکه‌های عصبی از مجموعه لایه‌هایی تشکیل می‌شود که لایه اول شامل ورودی‌ها و لایه آخر شامل خروجی‌ها می‌باشد. لایه‌های نهان نیز بین لایه‌های ورودی و خروجی قرار می‌گیرند. شبکه‌های عصبی براساس نوع فیزیکی مسئله می‌توانند تک‌لایه یا چند لایه باشند. هدف شبکه‌های عصبی یادگیری براساس اتصالات منطقی بین الگوهای پارامترهای ورودی و خروجی، آنالیز و یا یافتن ساختار الگوهای پارامترهای ورودی می‌باشد. با فراهم کردن شبکه‌های عصبی با داده‌های موجود، شبکه آموزش دیده از طریق اصلاح



شکل ۸. توابع انتقالی شبکه عصبی [۲۳]



شکل ۹. فلوچارت شبکه عصبی [۲۴]

شاخص‌های آماری

برای ارزیابی دقت کارایی مدل‌های توسعه یافته و بررسی روند عملکرد در مدل‌ها، تجزیه و تحلیل آماری شامل خطای مجذور میانگین مربعات خطا ((Root Mean Square Error (RMSE)، میانگین خطای تقری (Mean Bias Error (MBE) و ضریب هم‌بستگی ((Coefficient of determination (R2) انجام شده است. میانگین مربعات خطا، اطلاعاتی در مورد عملکرد کوتاه مدت ارائه می‌دهد که یک اندازه از تغییرات تخمین زده شده در اطراف داده‌های اندازه‌گیری شده است. هر چه میانگین مربعات خطا پایین‌تر باشد، تخمین دقیق‌تر است. میانگین خطای تقریبی، نشان‌های از انحراف میانگین مقادیر برآورد شده از داده‌های مربوط به اندازه‌گیری است و می‌تواند اطلاعاتی در مورد عملکرد بلندمدت مدل ارائه دهد. میانگین خطای تقریبی پایین‌تر و ضریب هم‌بستگی بیشتر مناسب‌تر می‌باشد. هر چه ضریب هم‌بستگی بیشتر باشد نشان‌دهنده میزان تطابق خروجی مدل با هدف (Target) است و اگر برابر با یک باشد گویای این است که خروجی سیستم با هدف برابر می‌باشد. جاکویدز [25] نشان داد استفاده از شاخص‌های میانگین مربعات خطا، میانگین خطای تقریبی تنها باعث اشتباه در مدل می‌شود. بنابراین در کنار این دو شاخص آزمون تی (T-Test) توصیه می‌شود، آزمون تی معیاری است که تفاوت واقعی بین دو شاخص را در مقایسه با تغییرات داده‌ها مقایسه می‌کند. به عبارت دیگر آزمون تی نشان‌دهنده اهمیت اختلاف شاخص‌ها با استفاده از متوسط خطاهای ریشه میانگین مربعات خطا و خطای متوسط میانگین خطای تقریبی است. روابط شاخص‌های گفته شده به صورت معادلات زیر می‌باشد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (6)$$

$$t\text{-test} = \sqrt{\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (7)$$

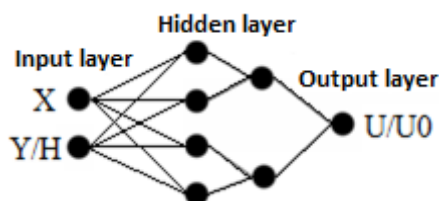
در معادلات فوق P_i مقدار پیش‌بینی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده و n تعداد مشاهدات می‌باشد. هر چه مقدار میانگین

مربعات خطا کمتر باشد، مدل از دقت بیشتری برخوردار است. اگر مقدار میانگین خطای تقریبی مثبت باشد، یعنی مقدار پیش‌بینی شده از مقدار اندازه‌گیری شده بیشتر و اگر مقدار میانگین خطای تقریبی منفی باشد، یعنی مقدار اندازه‌گیری شده از مقدار پیش‌بینی شده کمتر است.

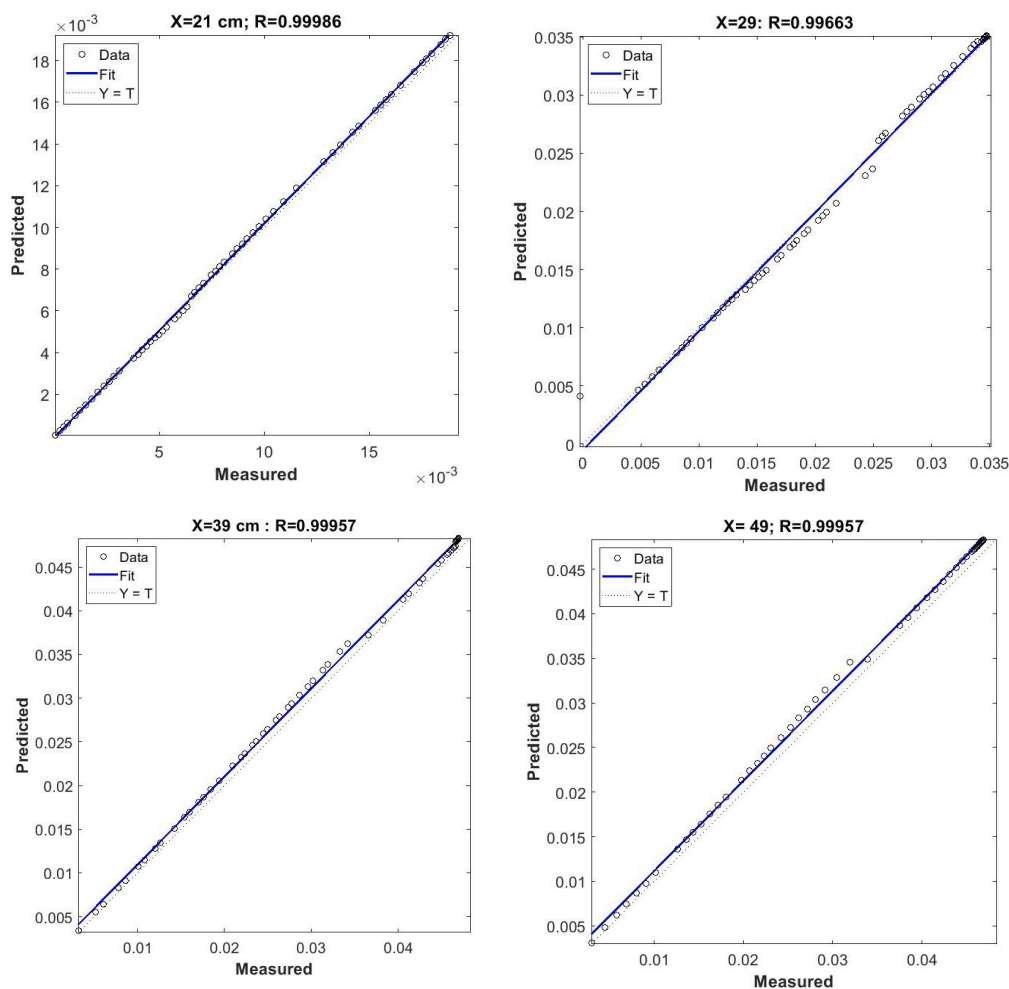
برای انجام شبیه‌سازی از داده‌های اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف دیفیوزر موردنظر استفاده شده است. از دیتاهای تجربی گزارش شده در مراجع [11,17] در این مقاله استفاده شده است. ۷۰ درصد از کل داده‌ها برای آموزش، ۱۵ درصد برای صحت سنجی و ۱۵ درصد برای آزمون انتخاب شده است. در شکل (۱۰) ورودی و خروجی‌های در نظر گرفته شده برای شبکه عصبی نشان داده شده است. در این جا نقاط x و y/H را به عنوان ورودی و U/U_0 را به عنوان خروجی شبکه عصبی طراحی شده در نظر گرفته شده است.

برای تعیین تعداد بهینه لایه‌های نهان از رویه سعی و خطا استفاده شده است. ساختاری با کمترین تعداد لایه‌های نهان با درجه خطای قابل قبول انتخاب می‌گردد. هر چه تعداد لایه‌های نهان یک شبکه کمتر باشد، زمان کمتری برای آموزش شبکه مورد نیاز است. همچنین تعداد نرون‌های موجود در لایه‌های نهان تأثیر به‌سزایی در عملکرد شبکه عصبی خواهد گذاشت.

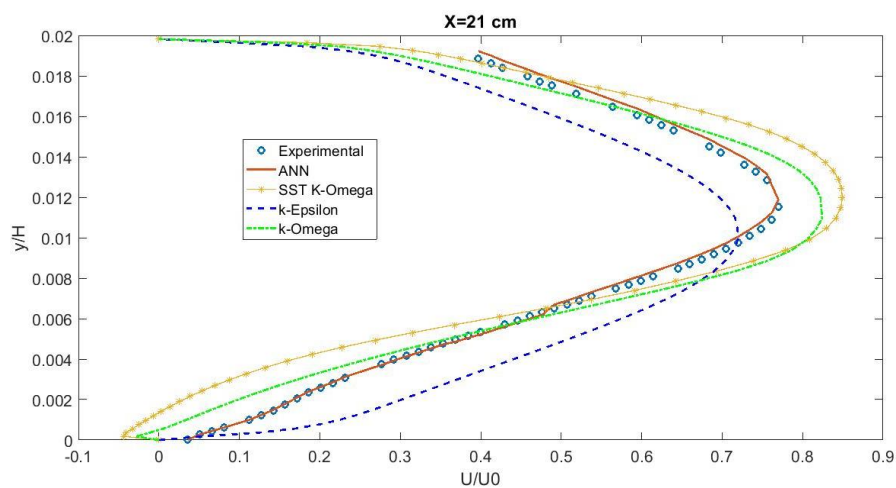
شبکه عصبی سه لایه انتخاب شده دارای تعداد نرون‌های {۵ و ۶ و ۷} می‌باشد که نتایج مقایسه آن با دیگر مدل‌های عددی در ادامه آورده شده است. در شکل (۱۱) ارتباط بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی انتخاب شده و نیز داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. در این شکل برای چهار نقطه موردنظر این نتایج نشان داده شده، همان‌طور که مشخص است میزان ضریب هم‌بستگی R برای هر چهار نقطه بالای ۰٫۹۹ می‌باشد که نشان‌دهنده دقت زیاد شبکه عصبی برای پیش‌بینی می‌باشد.



شکل ۱۰ شبکه عصبی طراحی شده



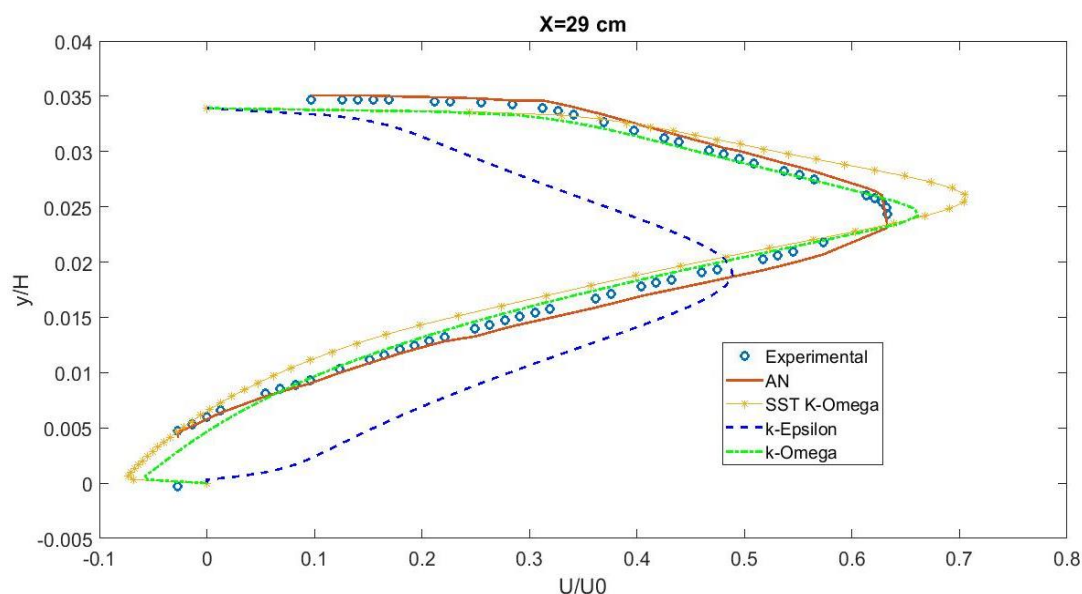
شکل ۱۱ ارتباط بین مقادیر واقعی و با مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی برای ۴ فاصله در نظر گرفته شده



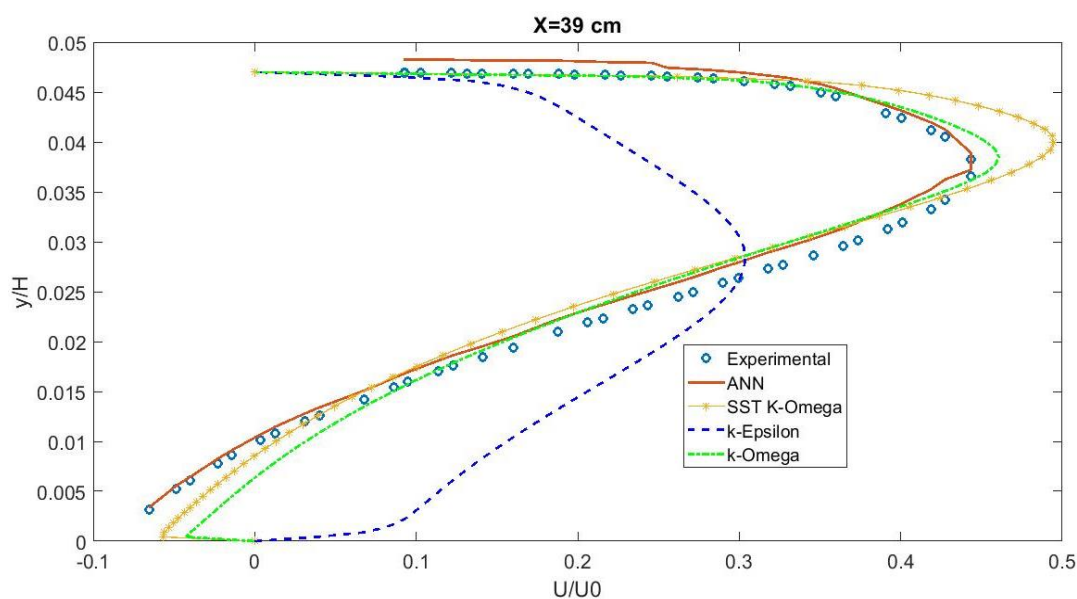
شکل ۱۲ مقایسه مدل‌ها با اندازه‌گیری تجربی در فاصله ۲۱ سانتی‌متری

پیش‌بینی شده‌است؛ اما مدل استاندارد $k-\varepsilon$ در پیش‌بینی جدایش جریان چندان موفق عمل نکرده‌است. جهت مقایسه بهتر این چهار مدل از شاخص‌های آماری استفاده شده، که نتایج حاصل از آن در جدول (۴) نشان داده شده‌است همان‌طور که مشخص است شبکه عصبی به‌خوبی و بهتر از دیگر مدل‌ها توانسته‌است پیش‌بینی سرعت موردنظر را انجام دهد.

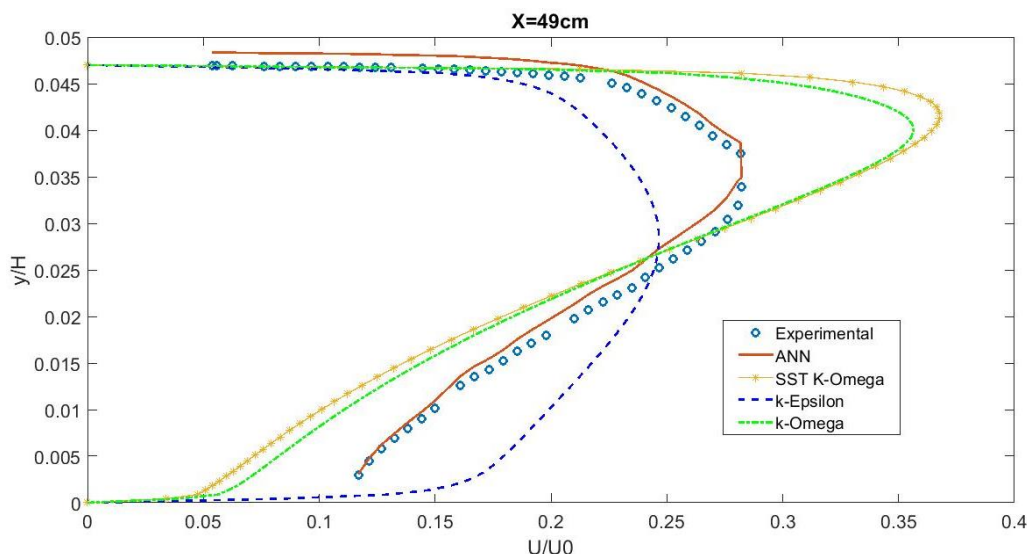
شکل (۱۲) مربوط به فاصله ۲۱ سانتی‌متری است که تمامی مدل‌ها با اندازه‌گیری تجربی مقایسه شده‌است. در شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) این نتایج برای فواصل ۲۹، ۳۹ و ۴۹ نشان داده شده‌است، کاملاً مشخص است که نتایج مربوط به مدل‌های استاندارد $k-\omega$ و SST $k-\omega$ قابل قبول و نتایج مدل ANN بسیار نزدیک به نتایج تجربی است و با دقت بیشتری جدایش جریان



شکل ۱۳ مقایسه مدل‌ها با اندازه‌گیری تجربی در فاصله ۲۹ سانتی‌متری



شکل ۱۴ مقایسه مدل‌ها با اندازه‌گیری تجربی در فاصله ۳۹ سانتی‌متری



شکل ۱۵ مقایسه مدل‌ها با اندازه‌گیری تجربی در فاصله ۴۹ سانتی‌متری

جدول ۴ نتایج شاخص‌های آماری چهار مدل استفاده شده در چهار نقطه ۲۱، ۲۹، ۳۹ و ۴۹ سانتی‌متری

X	ANN			استاندارد ω -k		
	t-test	MBE	RMSE	t-test	MBE	RMSE
۲۱	۷/۰۷۴	e ۵۸۰۹/۱-۴	e ۳۴۴۳/۲-۴	۱۱/۳۶۵۵	۰/۴۱۳۲	۰/۵
۲۹	۰/۴۳۵۳	-e ۸۴۳۲/۴-۵	e ۶۳۱۹/۸-۴	۷/۵۸۰۵	۰/۲۴۰۸	۰/۳۴۴۳
۳۹	۲۰/۱۴۳۱	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۲	۷/۷۲۶۶	۰/۱۶۹۷	۰/۲۴۰۳
۴۹	۲۳/۳۵۹۱	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۵	۱۳/۳۰۸۸	۰/۱۶۷۹	۰/۱۹۶۴
X	ε -K			ω -SST k		
	t-test	MBE	RMSE	t-test	MBE	RMSE
۲۱	۱۶/۷۱۰۱	۰/۴۲۹۰	۰/۴۷۲۹	۱۰/۱۵۸۱	۰/۴۱۳۶	۰/۵۲۰۱
۲۹	۱۲/۳۴۵۷	۰/۲۲۷۹	۰/۲۶۹۰	۶/۸۵۰۶	۰/۲۴۶۴	۰/۳۷۱۹
۳۹	۱۶/۹۰۹۷	۰/۱۵۸۰	۰/۱۷۳۸	۶/۹۹۴۴	۰/۱۷۲۷	۰/۲۵۷۷
۴۹	۲۷/۹۹۴۰	۰/۱۶۵۵	۰/۱۷۱۷	۱۲/۲۶۶۲	۰/۱۷۱۰	۰/۲۰۲۲

نتیجه‌گیری

و SST k- ω در نزدیک دیواره موفق‌تر عمل کرده‌اند. در این تحقیق مدل شبکه عصبی سه‌لایه انتخاب شده که دارای تعداد نرون‌های {۵ و ۶ و ۷} می‌باشد. نتایج مربوط به مدل‌های استاندارد k- ω و SST k- ω قابل قبول و نتایج مدل ANN بسیار نزدیک به نتایج تجربی است و با دقت بیشتری جدایش جریان پیش‌بینی شده‌است؛ اما مدل استاندارد k- ε در پیش‌بینی جدایش جریان چندان موفق عمل نکرده‌است. شاخص‌های آماری RMSE, MBE و t-test برای هر چهار مدل نیز محاسبه و مقایسه شد که نیز گویای این موضوع می‌باشند.

در این تحقیق برای پیش‌بینی جدایش جریان در دیفیوزر دوبعدی نامتقارن، سه مدل توربولانسی استاندارد k- ε ، استاندارد k- ω و SST k- ω و مدل هوشمند شبکه عصبی مورد بررسی قرار گرفتند. برای بررسی استقلال از شبکه از مدل آشفتگی استاندارد k- ε استفاده شده‌است. دیفیوزر دوبعدی نامتقارن با استفاده از شبکه-بندی نوع دوم یعنی Mesh B مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در این تحقیق مقدار عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ می‌باشد جریان با سرعت ورودی ۲۹/۲۱ متر بر ثانیه وارد دیفیوزر می‌شود. با توجه به مقدار عدد رینولدز و همچنین شکل‌های گزارش شده، مدل k- ω

RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)	میانگین گیری رینولدز	واژه نامه	
Root Mean Square Error (RMSE)	ریشه میانگین مربعات خطا	Artificial Neural Networks	شبکه های عصبی مصنوعی
Shear-Stress Transport	انتقال تنش برشی	Coefficient of determination (R^2)	ضریب تعیین
Tangent sigmoid (Tansig)	سیگموئید تانژانت	Computational-fluid-dynamics(CFD)	دینامیک سیالات محاسباتی
Target	هدف	Large Eddy Simulation	شبیه سازی گردابی بزرگ
T-Test	آزمون تی	Log sigmoid (Logsig)	سیگموئید لگاریتمی
		Mean Bias Error (MBE)	میانگین خطای اربیی
		Purelin sigmoid (Purelin)	سیگموئید خطی

مراجع

1. Bradshaw, P., "Understanding and Prediction of Turbulent Flow- 1996", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 18, No. 1, Pp. 45–54, Feb, (1997). doi: 10.1016/S0142-727X(96)00134-8.
2. Versteeg, H. K., and Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Longman group Ltd, (1998).
3. Launder, B. E., and Spalding, D. B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows", Numerical prediction of flow, heat transfer, *Turbulence and Combustion*, Vol. 3, No. 2, Pp. 269–289, (1974).
4. Launder, B. E., and Sharma, B. I., "Application of the Energy-dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc", *Letters in Heat and Mass Transfer*, Vol. 1, No. 2, Pp. 131–137, Nov, (1974).
5. Yakhot, V., and Smith, L. M., "The Renormalization Group, the ϵ -expansion and Derivation of Turbulence Models", *Jouranal Scince Computer.*, Vol. 7, No. 1, Pp. 35–61, (1992).
6. Wilcox, D. C., "Turbulence Modeling for CFD", DCW Industries, Inc., La Canada, CA., (1993).
7. Menter, F. R., "Two-equation Eddy-viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 32, No. 8, Pp. 1598–1605, Accessed: May 14, (2021). [Online].
8. Madaliev, E. U., Madaliev, M. E. U., Mullaev, I. I., Shoev, M. A. U., & Ibrokhimov, A. R. U. "Comparison of Turbulence Models for the Problem of an Asymmetric Two-Dimensional Plane Diffuser", *Middle European Scientific Bulletin*, Vol. 18, Pp. 119-127, (2021).
9. H. J. Kaltenbach, M. Fatica, R. Mittal, T. S. Lund, and P. Moin, "Study of Flow in a Planar Asymmetric Diffuser Using Large-eddy Simulation", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 390, Pp. 151–185, (1999),.
10. Z. Malikov, A. Mirzoev, M. Madaliev, D. Yakhshibayev and A. Usmonov, "Numerical Simulation of Flow through an Axisymmetric Two-dimensional Plane Diffuser Based on a New Two-fluid Turbulence Model", *International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT),IEEE* , Pp. 1-4, (2021).
11. C. U. Buice and J. K. Eaton, "Experimental Investigation of Flow through an Asymmetric Plane Diffuser", *Journal*

- of Fluids Engineering-transactions of The ASME*, Vol. 122, No. 2, Pp. 433–435, (2000).
12. Parpanchi, Seyed Morteza, et al. "Experimental Investigation of a Diffuser for Use in Skydiving Vertical Wind Tunnel", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 125, Pp. 110393, (2021).
 13. Ling, J., Kurzawski, A., Templeton, J., "Reynolds Averaged Turbulence Modelling Using Deep Neural Networks with Embedded Invariance", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 807, Pp. 155–66, (2016).
 14. Geneva, Nicholas, and Nicholas Zabaras, "Quantifying Model Form Uncertainty in Reynolds-Averaged Turbulence Models with Bayesian Deep Neural Networks", *Journal of Computational Physics*, Vol. 383, Pp. 125-147, (2019).
 15. Zhu, Linyang, et al. "Turbulence Closure for High Reynolds Number Airfoil Flows by Deep Neural Networks", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 110, Pp. 106452, (2021).
 16. Ti, Zilong, Xiao Wei Deng, and Mingming Zhang, "Artificial Neural Networks based wake model for power prediction of wind farm", *Renewable Energy*, Vol. 172, Pp. 618-631, (2021).
 17. Buice, C. U., & Eaton, J. K. (1996). "Experimental Investigation of Flow through an Asymmetric Plane Diffuser", *CTR Annual Research Briefs*, Vol. 21, Pp. 243-248, (1996).
 18. Heydari Nejad, Qasim, "Introduction to Turbulence", Tarbiat Modares University Publications, (2017). In Persian
 19. Hamisu, Muhammad Tukur, et al. "Numerical Study Of Flow In Asymmetric 2D Plane Diffusers With Different Inlet Channel Lengths", *CFD Letters*, Vol. 11(5), Pp. 1-21, (2019).
 20. Zamani Mohiabadi M., "The Instantaneous Prediction of the Global Solar Radiation in the Rafsanjan City", *Iranian Journal of Energy*, Vol. 16, No. 4, Pp. 15-31, (2012).
 21. Menhaj M. B., "Fundamentals of Neural Networks", *Amirkabir University*, Pp.37-40, (2013). In Persian
 22. Zamani Mohiabadi M., and Mirzaei M., "Comparison of Two Intelligent Models to Estimate the Instantaneous Global Solar Radiation in Semi-arid Climate Conditions: Application in Iran", *Journal of Earth System Science*, Vol. 126, No. 5, Pp. 75-88, (2017).
 23. Shafiey Dehaj, M., Zamani Mohiabadi, M., & Hosseini, S. M. S., "Sensitivity Analysis of 9 Models for Estimating the Power of Photovoltaic Monocrystal and Polycrystalline Panels", *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 51(4), Pp. 193-202, (2022).
 24. Zamani Mohiabadi, M., Jahromi, R., Hasani Dastjerdi, M., & Mehrabi Gouhari, E., "Estimating Efficiency of Monocrystalline and Polycrystalline Photovoltaic Panels Using Neural Network Models", *Iranian Journal of Energy*, Vol. 21, No.3, Pp. 87-100, (2018).
 25. Jacovides, C. P., "Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models", *Agricultural Water Management*, Vol. 3, Pp. 95-97, (1997).

Numerical Analysis of the Hydrodynamic Behavior of Three-Phase Mixing of Rice Husk, Sand, and Air in a Bubbling Fluidized Bed with Particle Granular Behavior*

Research Article

Reza Karimi Ahmadi¹

Hamid Reza Nazif²

1. Introduction

Biomass is recognized as a vital renewable energy source worldwide. Mixing and segregation of the biomass particles and bed material play a crucial role in the gasification process of the fluidized bed. A good mixing of these particles improves the quality of the synthesized gases emitted from the biomass gasification process. Limited experimental and numerical studies have been conducted to evaluate the optimal mixing conditions of biomass and bed material in the bubbling fluidized bed.

This study aimed to investigate the effects of wall boundary conditions for solid phases and the restitution coefficient of the particles on the mixing behavior of biomass (rice husk) and bed material (silica sand) in the bubbling fluidized bed reactor. In this study, the effect of three wall boundary conditions for solid phases was investigated including free slip ($\phi = 0$), partial slip ($\phi = 0.5$), and no-slip ($\phi = 1$) on the time-averaged volume fraction and velocity of solid particles in the bubbling fluidized bed. Then, the effect of the restitution coefficient on the time-averaged volume fraction and velocity of biomass (rice husk) and bed material (silica sand) particles in the bubbling fluidized bed was studied. For this study, the equations governing the Eulerian multiphase flow approach were solved along with the kinetic energy theory of solid particles in laminar air flow using computational fluid dynamics by finite volume method with Ansys Fluent software V.17.2.

2. Modeling

The primary phase of air was utilized as the fluidized agent, while the two granular solids of rice husk and sand were employed as the biomass and the bed materials, respectively. Figure 1 shows a schematic of a mixture of rice husk and silica sand particles in a two-dimensional bubbling bed under study. The diameter of silica sand particles was $440\ \mu\text{m}$ with the density of $2600\ \text{kg/m}^3$. The diameter of rice husk particles was $1540\ \mu\text{m}$ and its density was $950.6\ \text{kg/m}^3$. At the inlet boundary of the fluidized bed reactor, air (fluidization agent) without particles entered the bed from the reactor floor with a uniform velocity of $0.79\ \text{m/s}$. Therefore, at the inlet, the volume fraction of the solid phases of rice husk and silica sand was zero. In the walls, the no-slip boundary condition was used for the gas phase and the Johnson and

Jackson slip boundary condition was utilized for the solid phases. At the reactor outlet, the outlet pressure (atmospheric pressure) was applied. Also, the bed was initially filled to a height of $0.2\ \text{m}$ with particles of silica sand and rice husk with a volume fraction of 0.5133 and 0.0867 , respectively.

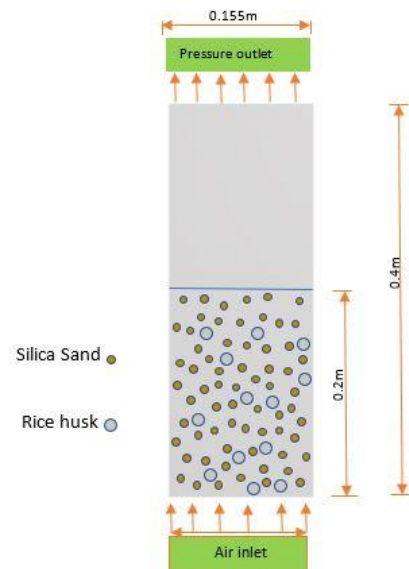


Figure 1. The schematic of mixing the rice husk and silica sand particles in the bubbling fluidized bed reactor studied

3. Solution procedure

In Ansys Fluent software, Eulerian multiphase flow equations are solved, correlated, and separated such as momentum equations, co-pressure equations, and volume fraction equations of different phases. By solving the equations separately, the Ansys Fluent software uses the Phase Coupled SIMPLE (PC-SIMPLE) algorithm for pressure-velocity correlation. PC-SIMPLE Algorithm is an extended form of a SIMPLE algorithm for a multi-phase current approach. In this research, for the unsteady formulation, a second-order implicit scheme was used, while the second-order scheme was utilized for the discretization of volume fractions and momentum. The simulation time was $30\ \text{s}$ with an averaging time of $25\ \text{s}$ ($5\text{--}30\ \text{s}$). For better convergence and stability in this study, the time step of 0.0001 was used. The maximum number of iterations per time step was 200 iterations. The convergence criterion for the maximum residuals between the two iterations was 0.001 .

Effect of specular coefficient on the mixing behavior of rice husk and silica sand particles in bubbling fluidized bed

The specular coefficient for the granular flow determines the impact fraction causing the momentum transfer to the walls. The value of the specular coefficient is from 0 to 1. Three coefficients of specular

* Manuscript received:10 July 2021; Revised, 26 February 2022, Accepted, 15 June 2022.

¹. MSc. Student, Mechanical Engineering, Faculty of Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

². Corresponding Author. Associate Professor, Mechanical Engineering, Faculty of Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. **E-mail:** nazif@eng.ikiu.ac.ir.

were investigated including free slip ($\phi = 0$), partial slip ($\phi = 0.5$), and no-slip ($\phi = 1$) without changing other parameters. In this study, air inlet velocity, volume fraction, and particle density were assumed to be constant. Moreover, the restitution coefficients between sand-sand, rice husk-rice husk, and rice husk-sand particles were 0.9, 0.6, and 0.6, respectively.

Effect of restitution coefficient on the mixing behavior of rice husk and silica sand in bubbling fluidized bed .

The restitution coefficient between solid phases indicates the interactions of particles in the fluidized bed. It causes momentum changes and energy fluctuations during interactions between phases. The restitution coefficient affects bulk viscosity, solid pressure, and shear stress of the solid phase. In this study, three types of rice husks were selected. Three restitution coefficients were investigated between rice husk (biomass) and silica sand (bed material) particles on the mixing behavior of rice husk and silica sand in the bubbling fluidized bed. The partial slip coefficient was used for both solid phases. Air inlet velocity, particle volume fraction, and particle density were assumed to be constant. For this study, the restitution coefficient of sand-sand particles was 0.9 as a constant, and the restitution coefficient of sand-rice husk and rice husk-rice husk particles were 0.6, 0.7, and 0.9, respectively.

4. Conclusion

This study investigated the effects of wall boundary conditions for solid phases. Using the Eulerian multi-phase approach along with the kinetic theory of granular flow, the restitution coefficient between solid particles of rice husk and silica sand on the mixing process of biomass (rice husk) and bed material (silica sand) in the bubbling fluidized bed was discussed. We studied the time-averaging distribution of the velocity of rice husk and silica sand particles, the time-averaging distribution of volume fraction of rice husk and silica sand particles, and pressure drop. To assess the effect of specular coefficient, three specular coefficients were investigated including free slip ($\phi = 0$), partial slip ($\phi = 0.5$), and no-slip ($\phi = 1$). It was revealed that the volume fraction of rice husk and silica sand particles in the walls and the core of the bed was higher than the partial slip and no-slip in the case of free slip ($\phi = 0$). Examining the pressure drop in the fluidized bed showed that in free slip conditions, the pressure drop was 8.09% and 14.2% less than partial slip and no-slip, respectively. The time-averaging profile of velocity and volume fraction of rice husk and silica sand particles was different in free slip conditions ($\phi = 0$) from no-slip ($\phi = 1$) and partial slip ($\phi = 0.5$). In the case of the partial slip, the highest velocity of rice husk and silica sand particles was observed. As a result, by increasing the velocity of the rice husk and the silica sand particles, a more uniform mixing occurred between the rice husk particles and the silica sand. Then, the effect of the restitution coefficient of particles was investigated. For this study, the restitution coefficient of sand-sand particles was 0.9 as a constant, and the restitution coefficient of between sand and rice husk particles and rice husk-rice husk particles were 0.6, 0.7,

and 0.9, respectively. It was indicated that with decreasing restitution coefficient between particles, the velocity of rice husk and sand particles increased by about 9%, while the pressure drop decreased by about 22%. It was also observed that with decreasing the restitution coefficient, the velocity of rice husk and silica sand particles, as well as the inelastic collisions increased. Therefore, the mechanical energy dissipation due to the collision of rice husk and silica sand particles increased, increasing the mixing of rice husk and silica sand particles.

تحلیل عددی رفتار هیدرودینامیک اختلاط سه فازي پوسته برنج، شن و هوا در بسترسیال حبابی با رفتار دانه‌ای ذرات*

رضا کریمی احمدی^(۱)حمیدرضا نظیف^(۲)

چکیده زیست‌توده به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر در سراسر جهان از اهمیت زیادی برخوردار است. نقش اختلاط و جدایش ذرات زیست‌توده و ماده بستر در فرایند گازی سازی بسترسیال بسیار حائز اهمیت است. هر چه میزان اختلاط این ذرات به خوبی انجام شود، کیفیت گازهای سنتز شده خروجی از فرایند گازی سازی زیست‌توده افزایش می‌یابد. این پژوهش با استفاده از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی به روش حجم محدود به بررسی فرایند اختلاط سه فازي پوسته برنج، شن و هوا در بسترسیال حبابی می‌پردازد. این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آنسیس فلوئنت نسخه ۱۷/۲ انجام شده است. تأثیر ضریب برخورد بین ذرات و شرایط مرزی دیوار برای فاز جامد در فرایند اختلاط زیست‌توده و ماده بستر مطالعه شده است. از رویکرد جریان چند فازي اوایلرین با متوسطگیری زمانی از سرعت و کسر حجمی فازهای جامد در این مطالعه استفاده شده است. فاز اولیه هوا به عنوان عامل سیالیت و دو فاز جامد دانه‌ای ثانویه شامل پوسته برنج در نقش زیست‌توده و شن در نقش ماده بستر و کاتالیزور به کار رفته است. ابعاد بسترسیال حبابی مورد مطالعه (۰/۴×۰/۱۵۵) متر می‌باشد. در این پژوهش، تأثیر لغزش آزاد ($\phi = 0$)، لغزش جزئی ($\phi = 0.5$) و بدون لغزش ($\phi = 1$) برای ذرات در برخورد با دیوار بررسی شده است. مطالعه شرایط مرزی دیوار برای فاز جامد نشان می‌دهد، توزیع متوسط زمانی کسر حجمی و سرعت برای حالت لغزش جزئی و بدون لغزش تقریباً نزدیک به هم می‌باشند. در شرایط لغزش جزئی، سرعت ذرات پوسته برنج و شن در مقایسه با دو حالت دیگر بیشتر می‌باشد. لذا، هر چه سرعت ذرات در بستر افزایش یابد، اختلاط و توزیع یک نواخت ذرات در بستر افزایش و جدایش و تفکیک ذرات کاهش می‌یابد. بررسی افت فشار در بستر سیال نشان می‌دهد، در شرایط لغزش آزاد، افت فشار به ترتیب ۸/۰۹٪ و ۱۴/۲٪ نسبت به دو حالت لغزش جزئی و بدون لغزش کمتر می‌باشد. همچنین سه نوع پوسته برنج با ضرایب برخورد متفاوت مطالعه شده است. در نتیجه این مطالعه، با کاهش ضریب برخورد بین ذرات، سرعت ذرات پوسته برنج و شن حدود ۹٪ افزایش و افت فشار حدود ۲۲٪ کاهش می‌یابد. هر چه ضریب برخورد کاهش پیدا کند، برخوردهای الاستیک نیز کاهش می‌یابد، در نتیجه اضمحلال انرژی مکانیکی ناشی از برخورد ذرات افزایش می‌یابد؛ بنابراین در این حالت، اختلاط ذرات پوسته برنج و شن افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی بسترسیال حبابی، رویکرد اوایلرین، هیدرودینامیک، زیست‌توده، اختلاط ماده بستر و زیست‌توده، ضریب برخورد، ضریب برخورد آینه‌ای، شرط مرزی دیوار برای فاز جامد.

مقدمه

فقط در جهت تجزیه و تحلیل ویژگی‌های سیال سازی زیست‌توده مانند حداقل سرعت سیالیت انجام شده است (راثو و همکاران [2]، عبدالله و همکاران [3]، کلارک و همکاران [4]، ژانگ و همکاران [5]). تجزیه و تحلیل تجربی هیدرودینامیک زیست‌توده در یک راکتور بسترسیال توسط گرس و کوی [6] انجام شده است. کیاکوین [7] مطالعه تجربی در جهت بررسی تجزیه و تحلیل رفتار اختلاط زیست‌توده (پوسته برنج) و ذرات شن انجام داده است. ژری و همکاران [8] در تحقیقی به بررسی رفتار اختلاط و جدایش ذرات در راکتور بسترسیال پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها در پیش‌بینی توزیع کسر حجمی ذرات از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. همچنین آن‌ها

راکتورهای بسترسیال به دلیل نرخ انتقال حرارت بالا، انتقال جرم و توانایی جداسازی محصولات جامد از اجزای فرار تولید شده در طول عملیات، در تجزیه شیمیایی حرارتی زیست‌توده بسیار مهم هستند. امروزه تخمین زده می‌شود حدود ۱۳ درصد از انرژی جهان توسط سوخت‌های مشتق شده از زیست‌توده تأمین می‌شود (دمیرباس و همکاران [1]). ذرات زیست‌توده به دلیل شکل، اندازه و چگالی خاصشان بدون وجود ماده بستر مانند شن سیلیس در راکتور بسترسیال، نمی‌توانند به طور یک نواخت مخلوط شوند. پژوهش‌های اندکی رفتار اختلاط ذرات زیست‌توده با ماده بستر را در راکتور بسترسیال بررسی کرده‌اند. برخی از مطالعات تجربی

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۴/۱۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۳/۲۵ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

نشان دادند با افزایش ضریب برخورد از ۰/۱ به ۰/۹۵، تجمع ذرات سنگین تر در کف بستر افزایش می یابد. هم چنین در این پژوهش، اثر سرعت هوای ورودی و نسبت قطر ذرات بر روی رفتار اختلاط و جدایش ذرات بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت هوای ورودی، جدایش ذرات افزایش می یابد. حمید و همکاران [9] در پژوهشی به بررسی عوامل مؤثر بر رفتار اختلاط و جدایش ذرات شن سیلیس و سلولز پرداختند. این پژوهش نشان داد با افزایش سرعت هوای ورودی، بین ذرات شن سیلیس و سلولز اختلاط بهتری انجام می شود. هم چنین این پژوهش نشان داد ذرات سلولز با قطر بزرگ تر اختلاط مناسب تری با ذرات شن سیلیس با چگالی بیشتر و قطر کوچک تر دارند. آنیسیس و همکاران [10] در پژوهشی به بررسی اختلاط و جدایش ذرات جامد در بسترسیال متراکم پرداختند. آن ها در این پژوهش مدل پسا شمال- ابراین کوپل شده با مدل فشار فاز جامد و توزیع شعاعی لون و همکاران را با مدل پسا کمینه سازی انرژی چند مقیاسی (ای-ام-ام-اس) کوپل شده با مدل فشار فاز جامد و توزیع شعاعی Ma-Ahmadi مقایسه کردند. این پژوهش نشان داد که مدل پسا کمینه سازی انرژی چند مقیاسی کوپل شده با مدل فشار فاز جامد و توزیع شعاعی Ma-Ahmadi از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. کرمی و همکاران [11] در پژوهشی به بررسی پدیده جدایش ذرات در بسترسیال پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش درصد ذرات سنگین تر در بستر، فعل و انفعالات ذرات سبک و سنگین در بستر بهبود می یابد، در نتیجه اختلاط ذرات در بستر افزایش می یابد. برای شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی زیست توده در راکتور بسترسیال، عمدتاً دو رویکرد اوپلر- اوپلری و اوپلر- لاگرانژی استفاده شده است. رویکرد اوپلر- اوپلری به دلیل امکان استفاده در راکتورهای بسترسیال با مقیاس بزرگ تر، هزینه محاسباتی پایین تر و سطح جزئیات ارائه شده بهتر، بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در رویکرد اوپلر- اوپلری فازهای جامد و گاز پیوسته رفتار می کنند و دائماً در هم نفوذ می کنند و تعامل بین آن ها با استفاده از نیروی پسا محاسبه می شود. پژوهش های بسیاری به بررسی و مقایسه مدل های پسا در بسترسیال حبایی گاز- جامد پرداختند. خزری و همکاران [12] در مطالعه ای به بررسی انواع مدل های رژیم جریان آشفته و مدل های پسا بر روی هیدرودینامیک راکتور گازی ساز بسترسیال

حبایی پرداختند. این پژوهش نشان داد که مدل آشفته گی-ا-اپسیلون آر-ان-جی و مدل پسا شمال- ابراین از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. هم چنین مشاهده شد که الگوی توزیع افت فشار در بستر در رژیم جریان آشفته متفاوت از رژیم جریان آرام است. وانگ و همکاران [13] در تحقیقی به مقایسه مدل های پسا بر روی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال حبایی سه بعدی پرداختند. در این پژوهش سه مدل پسا گیداسپاو، شمال- ابراین و ون- یو بررسی شد. این پژوهش نشان داد که مدل پسا گیداسپاو به خوبی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال را پیش بینی می کند. وارگسه و واکامالا [14] در تحقیقی به بررسی انواع مدل های آشفته گی و انواع مدل های پسا بر روی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال حبایی سه بعدی پرداختند. آن ها در این پژوهش سه مدل پسا گیداسپاو، شمال- ابراین و کمینه سازی انرژی چند مقیاسی (ای-ام-ام-اس) را بررسی کردند. نتایج نشان داد که انتخاب رژیم جریان آشفته-ا-اپسیلون به همراه مدل پسا کمینه سازی انرژی چند مقیاسی از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. اپادهای و همکاران [15] در مطالعه ای به بررسی اثر مدل های مختلف پسا بر روی رفتار هیدرودینامیک رایزر بسترسیال گردشی پرداختند. آن ها در این پژوهش نتایج حاصل از شش مدل پسا را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. این پژوهش نشان داد که نتایج حاصل از مدل های پسا گیداسپاو، ون- یو، هولین- گیداسپاو و شمال- ابراین در قسمت بالایی رایزر در پیش بینی توزیع ذرات جامد از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. در حالی که نتایج حاصل از مدل های پسا گیبیلارو و هلند در قسمت پایینی رایزر در پیش بینی توزیع ذرات جامد از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. لهلاتی و همکاران [16] در پژوهشی به بررسی مدل پسا اصلاح شده شمال- ابراین در تطابق با نتایج آزمایشگاهی پرداختند. این پژوهش نشان داد که مدل پسا اصلاح شده شمال- ابراین از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی در پیش بینی افت فشار و انبساط بستر برخوردار است. در بیشتر مطالعات انجام شده بسترسیال، تمرکز اصلی بر روی رفتار هیدرودینامیک فاز جامد منفرد در حضور گاز بوده است. زینانی و همکاران [17] پژوهشی در جهت بررسی اثر مدل پسا بر روی خواص سیالیت بسترسیال گاز- جامد انجام دادند. آن ها از این پژوهش دریافتند پسا گیداسپاو و هیل- کوچ- لند در پیش بینی

شکل حباب‌ها از اعتبار خوبی برخوردار می‌باشند. گاو و همکاران [18] در پژوهشی، به بررسی اثر انواع مدل‌های گردایان و رژیم آشفته‌گی بر روی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی و سرعت محوری ذرات در بسترسیال گاز- جامد پرداختند. آن‌ها دریافتند مدل گاووس به‌خوبی می‌تواند الگوی جریان را پیش‌بینی کند. هم‌چنین آن‌ها دریافتند مدل آشفته‌کا- اپسیلون آر- ان- جی در مقایسه با سایر مدل‌های آشفته‌گی از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. ورما و همکاران [19] در پژوهشی به بررسی اثر اندازه قطر بستر بر روی حرکت ذرات جامد و حباب‌ها به‌کمک رویکرد جریان دوفازی اوپلرین و تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای در بسترسیال سه‌بعدی پرداختند. آن‌ها در این پژوهش پنج اندازه قطر بستر را بررسی کردند. در این پژوهش مشاهده شد که با افزایش اندازه قطر بستر، کسر حجمی ذرات در نزدیکی دیوارها افزایش می‌یابد. اندازه و سرعت حباب‌ها نیز با افزایش اندازه قطر بستر افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران [20] در پژوهشی به بررسی اثر سرعت هوای ورودی بر روی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال پرداختند. این مطالعه نشان داد با افزایش سرعت هوای ورودی، توزیع کسر حجمی ذرات جامد در ناحیه بسترسیال کاهش می‌یابد. آیچه و همکاران [21] در پژوهشی به بررسی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال سه‌بعدی پرداختند. در این پژوهش از ذرات جامد گروه گلدارت D استفاده شد. هم‌چنین در این پژوهش از رویکرد جریان دوفازی اوپلرین همراه با رژیم جریان آشفته‌گی کا- اپسیلون در پیش‌بینی رفتار ذرات گروه گلدارت D استفاده شد. این پژوهش نشان داد که نتایج حاصل از حل عددی از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی عزیزی و همکاران برخوردار است. در رویکرد اوپلر- اوپلری، معادلات پیوستگی، بقای جرم و ممتم به‌طور جداگانه برای هر فاز بیان می‌شوند. هم‌چنین خواص فاز جامد با استفاده از تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای به‌دست می‌آید. از این‌رو گرانیروی و فشار فاز جامد برای مدل‌سازی مورد نیاز است. تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای به‌طور گسترده به‌عنوان یک مدل اساسی برای شبیه‌سازی خصوصیات جریان فاز جامد پذیرفته شده است. تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای براساس تئوری گازهای متراکم غیریک‌نواخت توسط چاپمن و همکاران [22] بیان شده است. رویکرد تئوری انرژی جنبشی از مدل یک معادله‌ای برای تعیین انرژی جنبشی آشفته یا دمای دانه‌ای ذرات استفاده می‌کند. رویکرد تئوری انرژی

جنبشی در جریان‌های دانه‌ای باعث می‌شود، تعیین فشار و گرانروی فاز جامد از نظر روابط تجربی که اتلاف انرژی ناشی از برخورد ذرات با ذرات (ضریب برخورد) را در نظر می‌گیرد، امکان‌پذیر شود. تاکنون پژوهش‌هایی در زمینه ضریب برخورد آینه‌ای و شرایط مرزی دیوار برای فاز جامد منفرد در راکتور بسترسیال حبابی انجام شده است. اگرچه این ضریب در راکتور بسترسیال حبابی در مقیاس کوچک نیز تأثیر قابل‌توجهی دارد. در مطالعاتی که انجام شده است از شرایط مرزی مختلفی برای فاز جامد استفاده شده است. برخی از محققان ترجیح دادند از شرط مرزی بدون لغزش استفاده کنند (دو و همکاران [23]، لی و گنسر [24]، وانگ [25]، ژو و همکاران [26]). بقیه پژوهشگران نیز از شرط مرزی لغزش استفاده کرده‌اند. در شرایط لغزش، مقادیر مختلف ضریب لغزش مورد استفاده قرار گرفته است. بعضی از پژوهشگران از ضریب لغزش جزئی استفاده کرده‌اند (آرمسترانگ و همکاران [27]، گلد اسمیت و همکاران [28]، جانگ و همکاران [29]، وانگ و همکاران [30]). هم‌چنین بقیه پژوهشگران نیز از شرط لغزش آزاد استفاده کرده‌اند (ساسیس و همکاران [31]، ون وچم و همکاران [32]، وانگ و همکاران [33]، یانگ و همکاران [34]). به‌رغم استفاده از شرایط مرزی مختلف دیوار برای فاز جامد، همه آن‌ها گزارش دادند که نتایج پژوهش از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار می‌باشد. همان‌طور که بررسی شد، پژوهش‌هایی که تاکنون انجام شده است، تمرکزشان بر روی شرایط مرزی دیوار برای فاز جامد منفرد بوده است و در پژوهش‌های معدودی به بررسی شرایط مرزی دیوار در سیستم‌های دارای بیش از یک فاز جامد می‌باشند، پرداخته شده است. هم‌چنین پیش‌بینی رفتار هیدرودینامیکی جریان بستر گاز جامد به ضریب برخورد ذرات با ذرات بستگی دارد. گلد اسمیت و همکاران [28]، در مطالعه‌ای به بررسی ضریب برخورد ذرات با یکدیگر پرداختند. آن‌ها نشان دادند که هیدرودینامیک بسترسیال متراکم به‌شدت به انرژی تلف‌شده ناشی از برخوردهای ذرات با یکدیگر بستگی دارد. کشتیریوم و همکاران [35] در پژوهشی، به بررسی اثر ضریب برخورد بین ذرات بر روی انبساط بسترسیال حبابی پرداختند. این پژوهش نشان داد که با افزایش ضریب برخورد بین ذرات از ۰/۹ تا ۰/۹۹ انبساط بستر افزایش می‌یابد. هم‌چنین در ادامه این پژوهش اثر ضریب برخورد آینه‌ای بررسی شد، این مطالعه نشان داد که با کاهش ضریب برخورد

چگالی زیست توده، قطر ذرات زیست توده، ضریب برخورد ذرات و شرایط مرزی دیوار بررسی شود. هدف از انجام این مطالعه، بررسی اثر شرایط مرزی دیوار برای فازهای جامد و ضریب برخورد ذرات با یکدیگر بر روی رفتار اختلاط زیست توده (پسته برنج) و ماده بستر (شن سیلیس) در یک راکتور بسترسیال حبابی می باشد. در این پژوهش اثر سه شرط مرزی دیوار برای فازهای جامد، لغزش آزاد ($\phi = 0$)، لغزش جزئی ($\phi = 0.5$) و بدون لغزش ($\phi = 1$) بر روی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی و توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات زیست توده (پسته برنج) و ماده بستر (شن سیلیس) در بسترسیال حبابی بررسی شده است. در ادامه، اثر ضریب برخورد ذرات با یکدیگر بر روی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی و توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات زیست توده (پسته برنج) و ماده بستر (شن سیلیس) در بسترسیال حبابی مطالعه شده است. برای انجام این مطالعه، معادلات حاکم بر رویکرد جریان چند فازي اوپلرین به همراه تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای ذرات جامد در جریان هوای آرام با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به روش حجم محدود به کمک نرم افزار انسیس فلوئنت نسخه ۱۷/۲ حل شده است.

مدل سازی اختلاط ذرات پسته برنج و شن سیلیس در راکتور بسترسیال حبابی

طرح‌واره اختلاط ذرات پسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال حبابی دوبعدی و Planar با عرض ۰/۱۵۵ متر و ارتفاع ۰/۴ متر در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. در این مسئله فرض شده است که عمق راکتور نسبت به طول و عرض آن بی نهایت است؛ یعنی از اثرات ضخامت صرف نظر شده است. همچنین در مقاله شارما و همکاران [57] به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از حل عددی دوبعدی و سه بعدی با نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است. این مقاله نشان می دهد تفاوت اندکی در نتایج حل دوبعدی و سه بعدی وجود دارد. همچنین در طراحی راکتور بسترسیال مورد مطالعه، مرکز راکتور بسترسیال، مبدأ مختصات در نظر گرفته شده است. در بستر مورد بررسی از تقارن استفاده نشده است؛ علت این موضوع این است که در صورت انتخاب نیمه این بستر طبیعتاً محاسبات سریع تر و کم حجم تر خواهد بود اما مشکل اساسی آن، این است که برای بررسی خطای محاسباتی

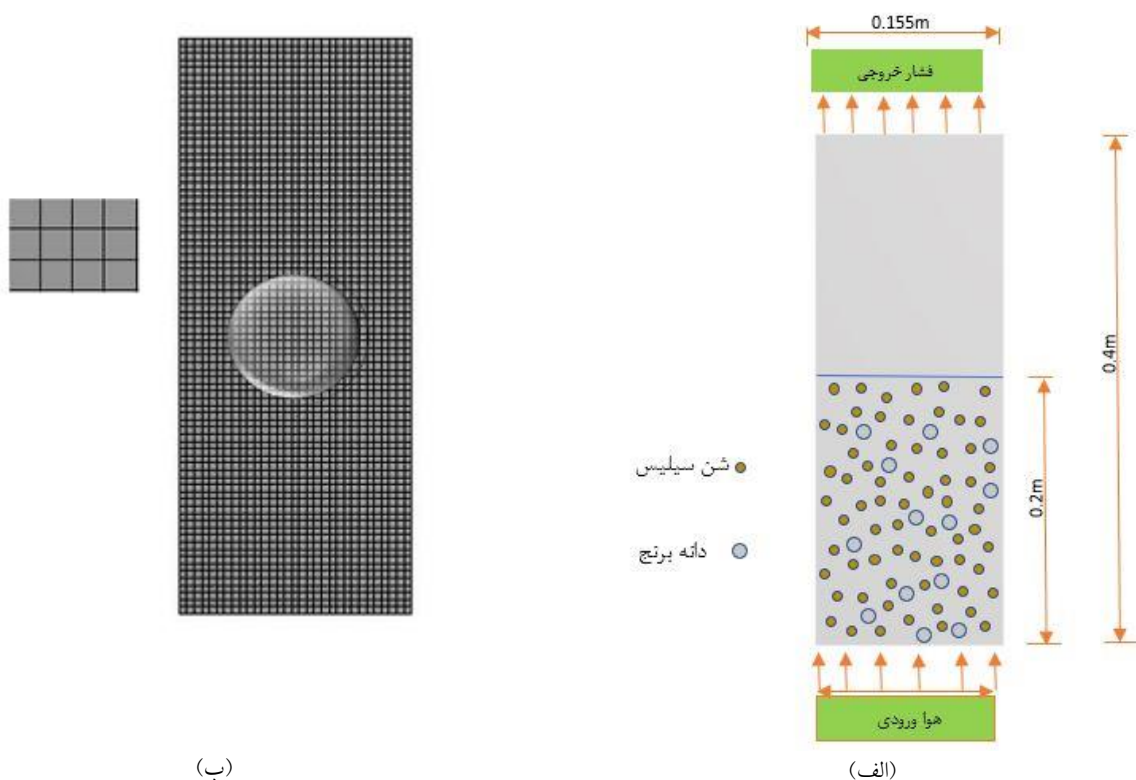
آیینهای، کسر حجمی و سرعت رو به پایین (سرعت منفی) ذرات در نزدیکی دیوارها افزایش می یابد. فد و همکاران [36] در پژوهشی به بررسی اثرات ضریب برخورد بین ذرات و ضریب برخورد آیینهای بر روی بسترسیال متراکم سه بعدی پرداختند، این پژوهش نشان داد که اندازه حبابها و انبساط بستر با کاهش ضریب برخورد بین ذرات افزایش می یابد. عبدالمطلب و همکاران [37] در پژوهشی به بررسی رفتار هیدرودینامیک و انتقال حرارت بسترسیال پرداختند. آنها در این پژوهش اثرات ضریب برخورد آیینهای و ضریب برخورد بین ذرات را بر روی انتقال حرارت دیوار به بستر و رفتار هیدرودینامیکی بستر بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که ضریب برخورد آیینهای و ضریب برخورد بین ذرات بر روی انتقال حرارت از دیوار به بستر تأثیر اندکی دارد ولی بر روی رفتار هیدرودینامیکی بسترسیال به ویژه افت فشار بستر تأثیر فراوانی دارد. کوتوکی و همکاران [38] در پژوهشی به بررسی اثر ضریب برخورد بین ذرات و ضریب برخورد آیینهای بر روی هیدرودینامیک بستر کانال افقی پرداختند. این پژوهش نشان داد که در مقادیر خاص ضریب برخورد در مرکز بستر سرعت ذرات جامد و گاز افزایش و در دیوارها کاهش می یابد. همچنین این پژوهش نشان داد با افزایش ضریب برخورد آیینهای، سرعت ذرات جامد و گاز افزایش می یابد. هولین و همکاران [39]، نشان دادند که برای به دست آوردن یک شبیه سازی واقع گرایانه از بسترسیال با استفاده از یک مدل بنیادی هیدرودینامیکی، در نظر گرفتن اثر فعل وانفعالات ذرات از اهمیت بالایی برخوردار است. تقی پور و همکاران [40]، مطالعه ای در زمینه هیدرودینامیک راکتور بسترسیال گاز جامد دوبعدی با ضرایب برخورد متفاوت انجام دادند، آنها حساسیت بالاتری را در هنگامی که سرعت از حداقل سرعت سیالیت بالاتر باشد دریافتند. همان طور که اشاره شد، بسیاری از پژوهش های انجام شده تمرکزشان بر روی ضریب برخورد ذرات تک فاز جامد در راکتور بسترسیال بوده است.

پژوهش های تجربی و عددی انجام شده برای ارزیابی شرایط مطلوب اختلاط زیست توده و ماده بستر در بسترسیال حبابی محدود می باشد. به علاوه برای افزایش انتقال گرما و جرم در هنگام تجزیه ترموشیمیایی زیست توده در یک راکتور بسترسیال حبابی باید پارامترهای مختلفی مانند تأثیر سرعت ورودی هوا،

تغییرات اندازه شبکه در نزدیکی دیوارها مطرح نیست. حداقل اندازه شبکه لازم برای جریان آرام در نظر گرفته شده است. هرچند ریزتر کردن اندازه المان خود نیز می تواند خطای محاسباتی در پی داشته باشد. برای پرهیز از خطای محاسباتی در این پژوهش، اندازه شبکه یک نواخت و برابر 0.005 متر در نظر گرفته شده است. شکل (۱- ب) نمونه شبکه محاسباتی بسترسیال حبابی مورد مطالعه را نشان می دهد.

در ادامه، معادلات حاکم بر بسترسیال مورد مطالعه قرار گرفته است. رویکرد مورد استفاده برای حل معادلات حاکم بر بسترسیال، رویکرد اوایلرین می باشد

با داشتن فقط نیمه بستر دچار مشکل می شویم؛ لذا مسئله به صورت دوبعدی Planar بررسی شد تا امکان چک تقارن نتایج وجود داشته باشد. قطر ذرات شن سیلیس 440 میکرومتر و چگالی آن 2600 کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. قطر ذرات پوسته برنج 1540 میکرومتر و چگالی آن $950/6$ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. هوا به عنوان عامل سیالیت از کف راکتور با سرعت یک نواخت 0.79 متر بر ثانیه وارد بستر می شود. بسترسیال ابتدا تا ارتفاع 0.2 متر با ذرات شن سیلیس و پوسته برنج به ترتیب با کسر حجمی 0.5133 و 0.4867 پر شده است. با توجه به این که رژیم جریان آرام می باشد و تغییرات شدید سرعت و پارامترهای دیگر در نزدیکی دیوارها وجود ندارد، لازم به ریزتر کردن و



شکل ۱ (الف) طرحواره اختلاط ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در راکتور بسترسیالی حبابی،
(ب) نمونه شبکه محاسباتی بسترسیال حبابی
مورد مطالعه

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\alpha_g \nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \vec{g} + K_{gs}(\vec{v}_g - \vec{v}_s) + K_{gr}(\vec{v}_g - \vec{v}_r) \quad (5)$$

معادله ممتنم برای فاز جامد (شن سیلیس)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla P - \nabla P_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + K_{sg}(\vec{v}_s - \vec{v}_g) + K_{sr}(\vec{v}_s - \vec{v}_r) \quad (6)$$

معادله ممتنم برای فاز جامد (پسته برنج)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_r \rho_r) + \nabla \cdot (\alpha_r \rho_r \vec{v}_r \vec{v}_r) = -\alpha_r \nabla P - \nabla P_r + \nabla \cdot \bar{\tau}_r + \alpha_r \rho_r \vec{g} + K_{rg}(\vec{v}_r - \vec{v}_g) + K_{rs}(\vec{v}_r - \vec{v}_s) \quad (7)$$

در عبارت فوق، P فشار مشترک بین دو فاز، $\bar{\tau}_g$ تاز سور تنش فاز گاز (هوا)، $\bar{\tau}_s$ تانسور تنش شن سیلیس، $\vec{g}$ شتاب جاذبه زمین، K_{gs} ضریب مبادله ممتنم بین فاز گاز (هوا) و شن سیلیس، K_{rs} ضریب مبادله ممتنم بین پسته برنج و شن سیلیس، K_{gr} ضریب مبادله ممتنم بین فاز گاز (هوا) و پسته برنج، P_s فشار شن سیلیس و P_r فشار پسته برنج می‌باشند.

$$\bar{\tau}_g = \alpha_g \mu_g (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T) + \alpha_g \left(\lambda_g - \frac{2}{3} \mu_g \right) \nabla \cdot \vec{v}_g \bar{I} \quad (8)$$

$$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \alpha_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I} \quad (9)$$

$$\bar{\tau}_r = \alpha_r \mu_r (\nabla \vec{v}_r + \nabla \vec{v}_r^T) + \alpha_r \left(\lambda_r - \frac{2}{3} \mu_r \right) \nabla \cdot \vec{v}_r \bar{I} \quad (10)$$

λ_g ویسکوزیته توده‌ای فاز گاز (هوا)، μ_g ویسکوزیته برشی فاز گاز (هوا)، λ_s ویسکوزیته توده‌ای شن سیلیس، μ_s ویسکوزیته برشی شن سیلیس، λ_r ویسکوزیته توده‌ای پسته برنج، μ_r ویسکوزیته برشی پسته برنج می‌باشند.

مدل پسا گاز- جامد

مدل پسا بین فاز گاز و فازهای جامد شن سیلیس و پسته برنج، مدل پسا گیدا سپاوا [45] می‌باشد. این پسا از ترکیب مدل پسا ون-یو [46] و معادله ارگان [47] به‌دست می‌آید. در این مدل اگر $\alpha_g > 0.8$ باشد، ضریب مبادله ممتنم بین

معادلات حاکم بر اختلاط ذرات پسته برنج و شن سیلیس در بسترسال حبابی

در این مطالعه از رویکرد اوپلر- اوپلری برای بررسی رفتار اختلاط زیست‌توده و ماده بستر استفاده شده‌است. فازهای گاز و جامد پیوسته در نظر گرفته شده‌اند و دائماً در هم نفوذ می‌کنند. در این رویکرد، معادلات بقای جرم و ممتنم برای هر فاز جداگانه حل می‌شوند.

کسر حجمی نشان‌دهنده میزان حجمی از فضا است که هر فاز اشغال می‌کند. کسر حجمی تابعی پیوسته از فضا و زمان است. جمع کسر حجمی فازها برابر با یک می‌باشد. معادلات حاکم هر فاز به‌طور جداگانه بیان می‌شود [41,42].

$$\alpha_g + \alpha_r + \alpha_s = 1 \quad (1)$$

α_g کسر حجمی هوا، α_s کسر حجمی شن سیلیس و α_r کسر حجمی پسته برنج می‌باشد.

معادلات بقای جرم

معادلات پیوستگی برای فاز گاز (هوا) و دو فاز جامد (پسته برنج و شن سیلیس) به شکل زیر بیان می‌شوند [43]:
برای فاز گاز (هوا):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = 0 \quad (2)$$

برای فاز جامد (شن سیلیس):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = 0 \quad (3)$$

برای فاز جامد (پسته برنج):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_r \rho_r) + \nabla \cdot (\alpha_r \rho_r \vec{v}_r \vec{v}_r) = 0 \quad (4)$$

$\vec{v}_g$ سرعت فاز گاز (هوا)، ρ_g چگالی فاز گاز (هوا)، ρ_s چگالی شن سیلیس، $\vec{v}_s$ سرعت شن سیلیس، ρ_r چگالی پسته برنج، $\vec{v}_r$ سرعت پسته برنج می‌باشند.

معادلات ممتنم

معادلات ممتنم برای فاز گاز (هوا) و دو فاز جامد (پسته برنج و شن سیلیس) به شکل زیر بیان می‌شوند [44]:
معادله ممتنم برای فاز گاز (هوا)

مدل پسا جامد- جامد

مدل پسا بین فازهای جامد، مدل پسا شمال- ابراین سیمتریک می باشد [49].

$$K_{rs} = \frac{3(1 + e_{rs}) \left(\frac{\pi}{2} + C_{fr,rs} \frac{\pi^2}{8} \right) \alpha_s \rho_s \alpha_r \rho_r (d_r + d_s)^2 g_{0,rs}}{2\pi(\rho_r d_r^3 + \rho_s d_s^3)} (\vec{v}_r - \vec{v}_s) \quad (19)$$

در عبارت فوق، $C_{fr,rs}$ ضریب اصطکاک بین ذرات پوسته برنج و شن سیلیس، e_{rs} ضریب برخورد بین ذرات پوسته برنج و شن سیلیس و $g_{0,rs}$ تابع توزیع شعاعی می باشد.

فشار جامد

فشار جامد در معادله انتقال ممتم فاز جامد به صورت زیر تعریف می شود:

$$P_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s(1 + e_{ss})\alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (20)$$

در رابطه فوق، e_{ss} ضریب برخورد بین ذرات جامد، وقتی این ضریب برابر با یک باشد برخورد به طور کامل الاستیک است ولی وقتی این ضریب برابر با صفر باشد برخورد پلاستیک است و θ_s دمای دانه ای متناسب با انرژی جنبشی نوسانی حرکت ذرات است.

معادله (۲۰) برای محاسبه فشار فازهای جامد پوسته برنج و شن سیلیس به صورت زیر بیان می شود [43]:

$$P_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2 \frac{d_s^3}{d_r^3} \rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s \alpha_s g_{0,ss} \theta_s + 2 \frac{d_{rs}^3}{d_s^3} \rho_s (1 + e_{rs}) \alpha_s \alpha_s g_{0,sr} \theta_s \quad (21)$$

$$P_r = \alpha_r \rho_r \theta_r + 2 \frac{d_r^3}{d_r^3} \rho_r (1 + e_{rr}) \alpha_r \alpha_r g_{0,rr} \theta_r + 2 \frac{d_{rs}^3}{d_r^3} \rho_r (1 + e_{rs}) \alpha_r \alpha_r g_{0,rs} \theta_r \quad (22)$$

در رابطه بالا $\theta_s, e_{rs} = \frac{e_r + e_s}{2}, d_{rs} = \frac{d_r + d_s}{2}$ دمای دانه ای ذرات شن سیلیس و θ_r دمای دانه ای ذرات پوسته برنج می باشد.

فاز گاز- شن سیلیس و فاز گاز- پوسته برنج را به شکل زیر می توان نوشت [45]:

$$K_{gs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \alpha_g^{-2.65} K_{gs} = K_{sg} \quad (11)$$

$$K_{gr} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_r \alpha_g \rho_g |\vec{v}_r - \vec{v}_g|}{d_r} \alpha_g^{-2.65} K_{gr} = K_{rg} \quad (12)$$

در رابطه فوق، C_D ضریب پسا، d_s قطر ذرات شن سیلیس و d_r قطر ذرات پوسته برنج می باشند [45].

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g Re_s} \left[1 + 0.15 (\alpha_g Re_s)^{0.687} \right] \quad (13)$$

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g Re_r} \left[1 + 0.15 (\alpha_g Re_r)^{0.687} \right] \quad (14)$$

که در رابطه بالا عدد رینولدز فاز جامد به شکل زیر تعریف می شود [48]:

$$Re_s = \frac{\rho_g d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{\mu_g} \quad (15)$$

$$Re_r = \frac{\rho_g d_r |\vec{v}_r - \vec{v}_g|}{\mu_g} \quad (16)$$

با توجه به معادله ذکر شده در رابطه (۱۵) و (۱۶)، عدد رینولدز برای ذرات شن سیلیس و پوسته برنج به ترتیب ۲۳/۵۲ و ۸۲/۳۳ محاسبه شده است. با توجه به این که عدد رینولدز محاسبه شده برای ذرات جامد بسیار پایین می باشد، لذا جریان در راکتور آرام می باشد.

هم چنین اگر $\alpha_g < 0.8$ باشد، ضریب مبادله ممتم بین فاز گاز- شن سیلیس و فاز گاز-پوسته برنج به شکل زیر بیان می شود [45]:

$$K_{gs} = 150 \frac{\alpha_s \mu_g (1 - \alpha_g)}{\alpha_g d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_g \alpha_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} K_{gs} = K_{sg} \quad (17)$$

$$K_{gr} = 150 \frac{\alpha_r \mu_g (1 - \alpha_g)}{\alpha_g d_r^2} + 1.75 \frac{\rho_g \alpha_r |\vec{v}_r - \vec{v}_g|}{d_r} K_{gr} = K_{rg} \quad (18)$$

لزجت توده‌ای ذرات پسته برنج و شن سیلیس

لزجت توده‌ای نشان‌دهنده مقاومت ذرات جامد دانه‌ای پسته برنج و شن سیلیس در برابر انقباض و انبساط می‌باشد [52]:

$$\Lambda_r = \frac{4}{3} \alpha_r \rho_r d_r g_{0,rr} (1 + e_{rr}) \left(\frac{\theta_r}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (31)$$

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

دمای دانه‌ای ذرات پسته برنج و شن سیلیس

دمای دانه‌ای ذرات جامد پسته برنج و شن سیلیس با انرژی جنبشی ذرات رابطه دارند. معادله انتقال از تئوری جنبشی به دست می‌آید و به شکل زیر بیان می‌شود [44]:

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_r \rho_r \theta_r) + \nabla \cdot (\alpha_r \rho_r \vec{v}_r \theta_r) \right] \\ &= (-P_r \bar{I} + \bar{\tau}_r) : \nabla \vec{v}_r + \nabla \cdot (k_{\theta_r} \nabla \theta_r) - \gamma \theta_r + \phi_{lr} \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \theta_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \theta_s) \right] \\ &= (-P_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma \theta_s + \phi_{ls} \end{aligned} \quad (34)$$

در رابطه فوق، $(-P_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s$ انرژی تولیدی توسط تانسور تنش شن سیلیس، $k_{\theta_s} \nabla \theta_s$ نفوذ شن سیلیس، $\gamma \theta_s$ اضمحلال انرژی ناشی از برخورد ذرات شن سیلیس، ϕ_{ls} مبادله انرژی بین هوا و شن سیلیس، $(-P_r \bar{I} + \bar{\tau}_r) : \nabla \vec{v}_r$ انرژی تولیدی توسط تانسور تنش پسته برنج، $k_{\theta_r} \nabla \theta_r$ نفوذ پسته برنج، $\gamma \theta_r$ اضمحلال انرژی ناشی از برخورد ذرات پسته برنج، ϕ_{lr} مبادله انرژی بین هوا و پسته برنج می‌باشند.

برای بستر سیال آرام و متراکم می‌توان از جمله‌های نفوذ و جابه‌جایی صرف‌نظر کرد [51]:

$$(-P_r \bar{I} + \bar{\tau}_r) : \nabla \vec{v}_r - \gamma \theta_r + \phi_{gr} = 0 \quad (35)$$

$$(-P_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s - \gamma \theta_s + \phi_{gs} = 0 \quad (36)$$

هم‌چنین دو جمله سمت راست معادله بالا را می‌توان به شکل زیر نوشت [45,52]:

$$\gamma \theta_r = \frac{12(1 - e_{rr}^2) g_{0,rr}}{d_r \pi^2} \alpha_r^2 \rho_r \theta_r^{\frac{3}{2}} \quad (37)$$

تابع توزیع شعاعی

این تابع زمانی که فازهای جامد دانه‌ای باشند، احتمال برخورد بین ذرات را تصحیح می‌کند [50].

$$g_{0,sr} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} + \frac{1}{2} d_s \left(\frac{\alpha_s}{d_s} + \frac{\alpha_r}{d_r} \right) \quad (23)$$

$$g_{0,rs} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_r}{\alpha_{r,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} + \frac{1}{2} d_r \left(\frac{\alpha_r}{d_r} + \frac{\alpha_s}{d_s} \right) \quad (24)$$

در رابطه بالا، $\alpha_{s,max} = 0.63$ و $\alpha_{r,max} = 0.63$

تنش برشی جامد

تانسور تنش ذرات جامد شن سیلیس و پسته برنج بر اثر تبادل ممتنم بین ذرات بر اثر چرخش یا برخورد ذرات به‌وجود می‌آید. تانسور تنش ذرات جامد شن سیلیس و پسته برنج شامل لزجت برشی و لزجت توده‌ای می‌باشد. لزجت برشی نیز شامل لزجت برخورد و لزجت جنبشی ذرات می‌باشد.

$$\mu_r = \mu_{r,col} + \mu_{r,kin} \quad (25)$$

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} \quad (26)$$

لزجت برخورد پسته برنج و شن سیلیس. لزجت برخورد ذرات پسته برنج و شن سیلیس توسط رابطه‌های زیر بیان می‌شوند [45,51]:

$$\mu_{r,col} = \frac{4}{5} \alpha_r \rho_r d_r g_{0,rr} (1 + e_{rr}) \left(\frac{\theta_r}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha_r \quad (27)$$

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha_s \quad (28)$$

لزجت جنبشی پسته برنج و شن سیلیس. لزجت جنبشی ذرات پسته برنج و شن سیلیس توسط رابطه‌های زیر بیان می‌شوند [51]:

$$\mu_{r,kin} = \frac{\alpha_r \rho_r d_r (\theta_r \pi)^{\frac{1}{2}}}{6(3 - e_{rr})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{rr}) (3e_{rr} - 1) \alpha_r g_{0,rr} \right] \quad (29)$$

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s \rho_s d_s (\theta_s \pi)^{\frac{1}{2}}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss} \right] \quad (30)$$

بسیار کوتاه است، از اثر نیرو برا صرف نظر می شود [43, 54-56]. هم چنین با توجه به این که چگالی فاز جامد بسیار بزرگ تر از چگالی فاز گاز می باشد از نیروی جرم مجازی نیز صرف نظر شده است [43, 56]؛ بنابراین تنها نیروی تأثیرگذار بین دو فاز که نقش مهمی را ایفا می کند نیروی پسا می باشد.

روش حل معادلات حاکم بر اختلاط ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال حبابی

در پژوهش حاضر، معادلات حاکم بر رویکرد جریان چند فازی اوایلین به همراه تئوری انرژی جنبشی دانه ای ذرات جامد در جریان هوای آرام با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به روش حجم محدود به کمک نرم افزار انسیس فلوئنت نسخه ۱۷/۲ حل شده است. در نرم افزار انسیس فلوئنت، معادلات رویکرد جریان چند فازی اوایلین مثل معادلات ممتم، فشار مشترک و معادلات کسر حجمی فازهای مختلف به صورت هم بسته و تفکیک شده حل می شوند. هنگامی که معادلات به صورت تفکیک شده حل شوند، نرم افزار انسیس فلوئنت از الگوریتم Phase Coupled SIMPLE (PC-SIMPLE) برای هم بسته کردن فشار- سرعت استفاده می کند. الگوریتم PC-SIMPLE شکل توسعه یافته الگوریتم SIMPLE برای رویکرد جریان های چند فازی می باشد. در این پژوهش برای گسسته سازی ترم مشتق زمانی جریان ناپایا از مرتبه دوم ضمنی در نرم افزار فلوئنت استفاده شده است. هم چنین برای گسسته سازی کسر حجمی و ممتم، بالادست مرتبه دوم به کار برده شده است. مدت زمان شبیه سازی ۳۰ ثانیه و مدت زمان متوسط گیری در این پژوهش ۲۵ ثانیه (ثانیه ۵ تا ثانیه ۳۰) می باشد. در این تحقیق برای هم گرایی و پایداری بهتر از گام زمانی ۰/۰۰۰۱ استفاده شده است. حداکثر تعداد تکرار در هر گام زمانی بر روی عدد ۲۰۰ تکرار تنظیم شده است. معیار هم گرایی برای حداکثر باقی مانده ها بین دو تکرار روی ۰/۰۰۱ تنظیم شده است. تمام شبیه سازی های این پژوهش در حالت موازی با پردازنده هشت هسته ای اینتل زئون ایکس ۵۵۷۰ با فرکانس ۲/۹۳ گیگاهرتز و با رم ۸ گیگ انجام شده است. برای نمونه مدت زمان بررسی اثر ضریب برخورد آئینه ای حالت بدون لغزش بر روی رفتار اختلاط بسترسیال با سیستم ذکر شده حدود ۷۲ ساعت و ۰۹ دقیقه به طول انجامید. هم چنین الگوریتم حل مسئله در شکل زیر نشان داده شده است.

$$\gamma\theta_s = \frac{12(1 - e_{ss}^2)g_{0,ss}}{d_s\pi^2}\alpha_s^2\rho_s\theta_s^{\frac{3}{2}} \quad (38)$$

$$\varphi_{gr} = -3K_{lr}\theta_r \quad (39)$$

$$\varphi_{gs} = -3K_{ls}\theta_s \quad (40)$$

شرایط مرزی اختلاط ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال حبابی

در مرز ورودی راکتور بسترسیال، هوا بدون ذرات با سرعت یک نواخت ۰/۷۹ متر بر ثانیه، از کف راکتور وارد بستر می شود و بنابراین در ورودی، کسر حجمی فازهای جامد پوسته برنج و شن سیلیس برابر با صفر می باشند. در دیوارها برای فاز گاز از شرط مرزی بدون لغزش و برای فازهای جامد از شرط مرزی لغزش جانسون و جکسون [53] استفاده شده است که رابطه آن را به شکل زیر می توان نوشت:

$$v_{sw} = -A \frac{\partial v_{sw}}{\partial n} \quad (41)$$

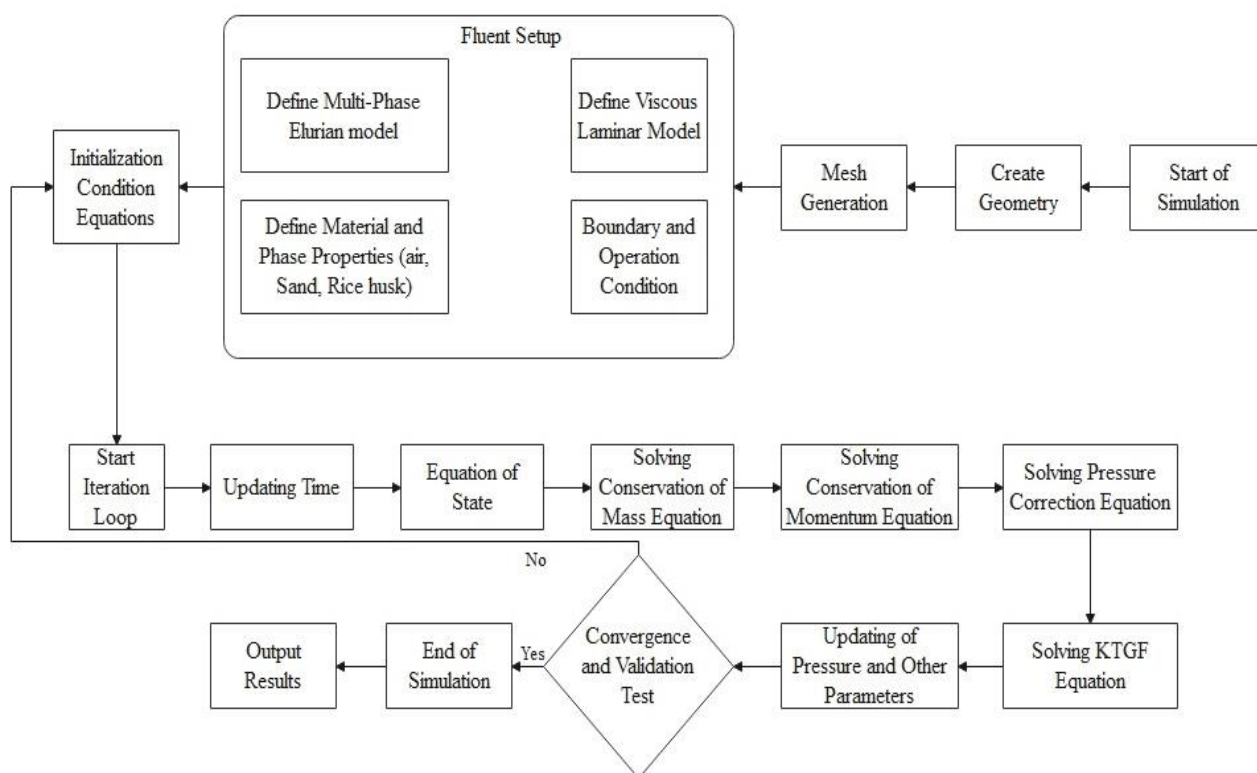
$$v_{rw} = -A \frac{\partial v_{rw}}{\partial n} \quad (42)$$

ضریب لغزش A به صورت جمله ای از ضریب برخورد آئینه ای به شکل زیر تعریف می شود:

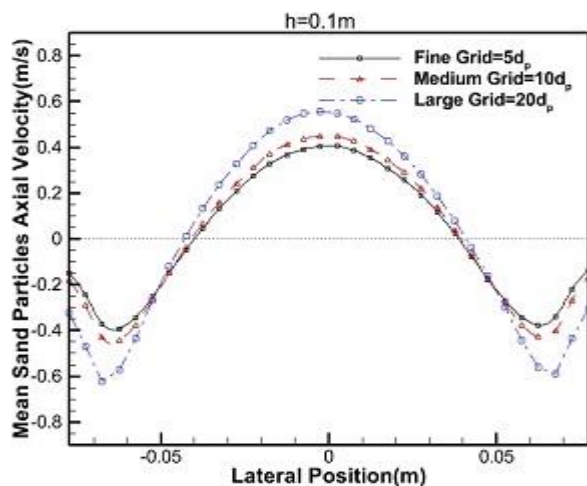
$$A = \frac{6\mu_r\alpha_{r,max}}{\sqrt{3}\pi\phi\rho_r\varepsilon_{rg0,rr}\sqrt{\theta_r}} \quad (43)$$

$$A = \frac{6\mu_s\alpha_{s,max}}{\sqrt{3}\pi\phi\rho_s\varepsilon_{sg0,ss}\sqrt{\theta_s}} \quad (44)$$

در خروجی راکتور از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده است. نیروی های بین سه فاز گاز، پوسته برنج و شن سیلیس شامل نیروهای پسا، برا و نیروی جرم مجازی می باشند. در بسیاری از مقالات، اشاره شده است که نیروی برا برای ذرات با قطر بزرگ غالب می باشد؛ اما هنگامی که قطر ذرات بسیار کوچک تر از فاصله بین ذرات باشد، در نظر گرفتن نیروی برا مناسب نیست؛ بنابراین از اثر نیروی برا برای بسترسیال پر شده با ذرات بسیار کوچک صرف نظر می شود. هم چنین در مقالات اشاره شده است که با توجه به این که در بسترسیال حبابی ذرات جامد با یکدیگر برخورد/ تماس پیدا می کنند و مسیر آزاد یک ذره ی



شکل ۲ الگوریتم حل مسئله حاضر



شکل ۳ متوسط سرعت محوری ذرات شن سیلیس در جهت امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱ متر نسبت به کف بستر برای سه شبکه مختلف مورد مطالعه

اعتبارسنجی پژوهش

پیش از پرداختن به مطالعه اثر ضریب برخورد آیینهای و ضریب برخورد ذرات با یکدیگر بر روی هند سه و شرایط مورد مطالعه،

مطالعه استقلال از شبکه

در جهت مطالعه استقلال از شبکه، از سه شبکه با اندازه‌های مختلف استفاده شده است. یک شبکه درشت با اندازه ۲۰ برابر قطر ذره، یک شبکه متوسط با اندازه ۱۰ برابر قطر ذره و یک شبکه ریز با اندازه ۵ برابر قطر ذره مورد مطالعه قرار گرفته است. متوسط سرعت ذرات جامد در ارتفاع ۰/۱ متر نسبت به کف بستر برای سه شبکه در شکل (۳) رسم شده است. شکل (۳) نشان می‌دهد، میزان اختلاف متوسط زمانی سرعت ذرات شن سیلیس در دو شبکه ریز و درشت حدود ۳۸/۷٪ می‌باشد. درحالی‌که با ریزتر کردن شبکه و استفاده از شبکه محاسباتی متوسط، این اختلاف به کمتر از ۸٪ می‌رسد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف قابل توجهی بین دو شبکه ریز و متوسط مورد مطالعه وجود ندارد؛ بنابراین در این پژوهش از شبکه متوسط با اندازه ۱۰ برابر قطر ذره استفاده می‌شود. هم‌چنین بسیاری از محققان از اندازه شبکه مشابهی در پژوهش‌های مرتبط با بسترسیال استفاده کرده‌اند [29,32].

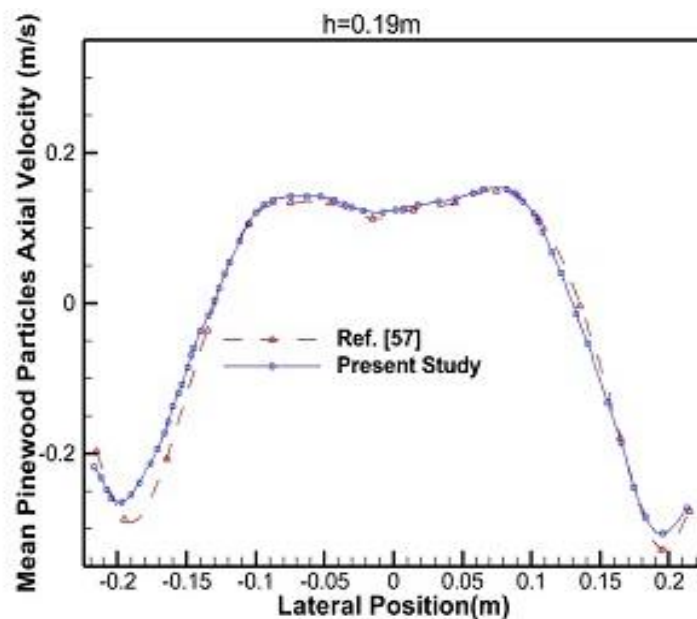
و ۵۸۴ کیلوگرم بر مترمکعب، قطر و چگالی ذرات زغال زیستی به ترتیب ۱ میلی متر و ۱۴۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. ضریب برخورد بین ذرات چوب کاج ۰/۶ و ضریب برخورد بین ذرات زغال زیستی ۰/۹ می باشد. هم چنین کسر حجمی ذرات چوب کاج و زغال زیستی به ترتیب ۰/۰۸۱ و ۰/۵۱۹ می باشد. در شکل (۴)، جهت اعتبارسنجی این مطالعه، متوسط سرعت ذرات چوب کاج در ارتفاع ۰/۱۹ متر نسبت به کف بستر با نتایج پژوهش [57] مورد مقایسه قرار گرفته است.

لازم است نسبت به کارهای قبلی اعتبارسنجی انجام شود. جدول (۱) اعداد انتخاب شده برای ضریب برخورد آینه ای و ضریب برخورد بین ذرات پژوهش های مشابه (تجربی و عددی) را نشان می دهد.

بدین منظور به مقایسه و اعتبارسنجی نتایج پژوهش حاضر با نتایج حل عددی اختلاط ذرات چوب کاج و زغال زیستی شارما و همکاران [57] پرداخته شد. ارتفاع راکتور بسترسیال ۲ متر و عرض آن ۰/۴۵ متر است. سرعت هوای ورودی ۰/۷۹ متر بر ثانیه، قطر و چگالی ذرات چوب کاج به ترتیب ۱/۵۴ میلی متر

جدول ۱ ضریب برخورد آینه ای و ضریب برخورد بین ذرات مطالعات پیشین

محققان	ضریب برخورد آینه ای	ضریب برخورد ذرات شن سیلیس	ضریب برخورد ذرات پوسته برنج
ژی و مونرو [58]	لغزش جزئی	۰/۹۸ تا ۰/۹	-
احمد و همکاران [59]	لغزش جزئی	۰/۹	-
پرواسانی و بووا [60]	لغزش جزئی	۰/۹	-
حمید و همکاران [9]	لغزش جزئی	۰/۹۷	-
عبدالمطلب [37]	لغزش جزئی	۰/۹۸ تا ۰/۸۵	-
شارما و همکاران [57]	لغزش جزئی	۰/۹	۰/۶
کیاکوین و همکاران [7]	لغزش جزئی	۰/۹	۰/۶
گورین و همکاران [61]	لغزش جزئی	۰/۹	-
وانگ و همکاران [62]	لغزش جزئی	۰/۹	۰/۶



شکل ۴ متوسط سرعت محوری ذرات چوب کاج در جهت امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱۹ متر نسبت به کف بستر

نتایج مطالعه اختلاط ذرات پسته برنج و شن سیلیس در

بستر سیال حبابی

بررسی اثر ضریب برخورد آئینه‌ای بر روی رفتار اختلاط ذرات پسته برنج و شن سیلیس در بستر سیال حبابی. بخش اول این پژوهش به بررسی اثر ضریب برخورد آئینه‌ای بر روی رفتار هیدرودینامیک اختلاط پسته برنج (زیست‌توده) و شن سیلیس (ماده بستر) در بستر سیال حبابی می‌پردازد. ضریب برخورد آئینه‌ای برای جریان‌های دانه‌ای تعیین‌کننده کسری از برخورد می‌باشد که باعث انتقال ممتد به دیوارها می‌شود. محدوده مقدار ضریب برخورد آئینه‌ای از ۰ تا ۱ می‌باشد. سه ضریب برخورد آئینه‌ای، لغزش آزاد ($\phi = 0$)، لغزش جزئی ($\phi = 0.5$) و بدون لغزش ($\phi = 1$) بدون تغییر پارامترهای دیگر بررسی شده‌است. در این بررسی سرعت ورودی هوا، کسر حجمی و چگالی ذرات ثابت فرض شده‌است. هم‌چنین ضرایب برخورد بین ذرات شن-شن، پسته برنج-پسته برنج و پسته برنج-شن به ترتیب ۰/۹، ۰/۶ و ۰/۶ در نظر گرفته شده‌است.

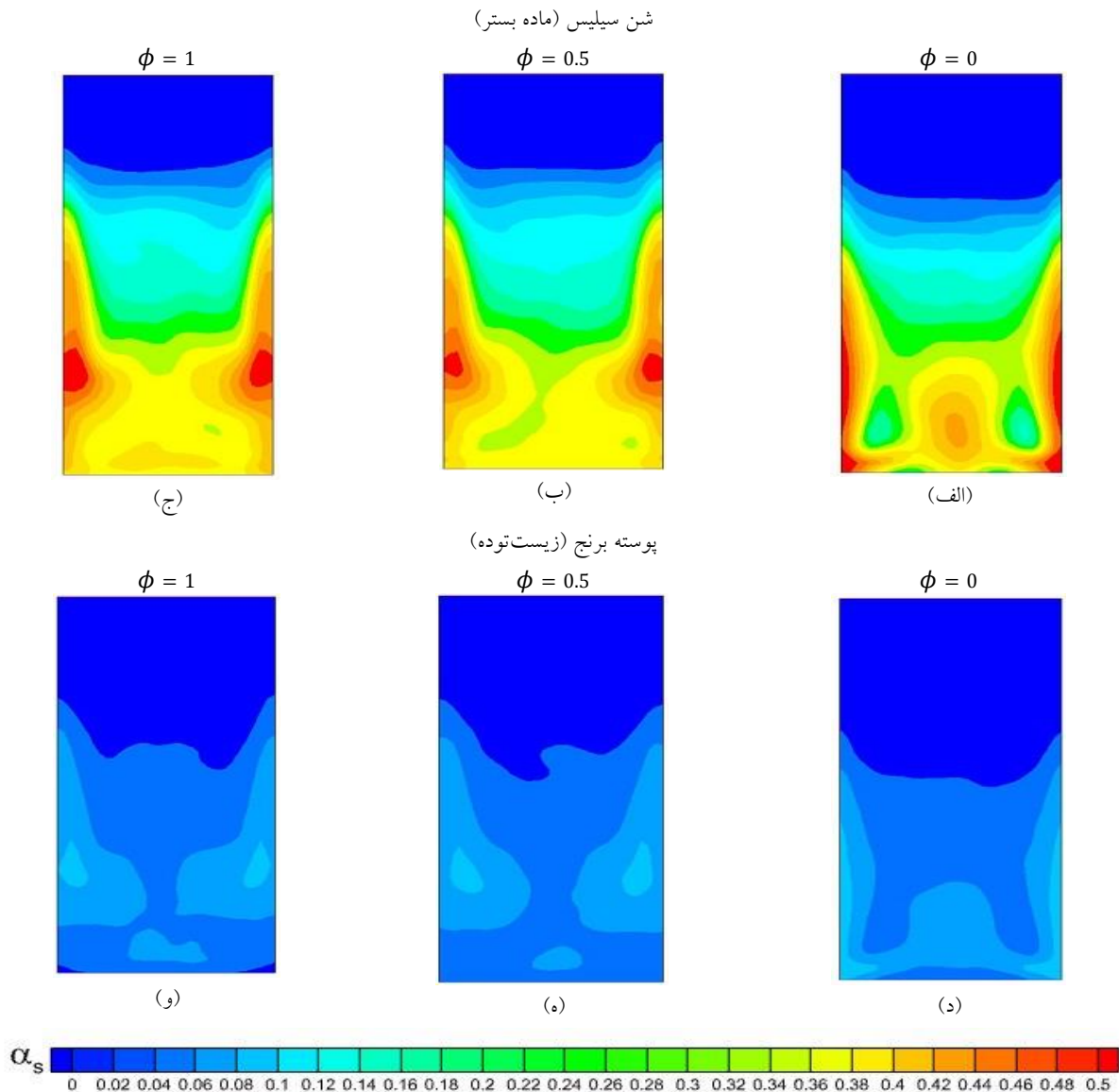
بررسی اثر ضریب برخورد آئینه‌ای بر روی توزیع کسر حجمی

ذرات پسته برنج و شن سیلیس. شکل (۵) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی پسته برنج و شن سیلیس را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، بیشترین کسر حجمی در نزدیکی دیوارها و مرکز بستر اتفاق می‌افتد؛ به این دلیل که سرعت ذرات پسته برنج و شن سیلیس در نزدیکی دیوارها کم می‌باشد. هم‌چنین عامل بالا بردن ذرات که نیروی پسا در راکتور بستر سیال می‌باشد در مرکز بستر زیاد و در نزدیکی دیوارها پایین می‌باشد، لذا با کاهش سرعت ذرات و پایین بودن نیروی پسا، تجمع ذرات در دیوارها افزایش می‌یابد و با افزایش تجمع ذرات در دیوارها، کسر حجمی ذرات پسته برنج و شن سیلیس در دیوارها افزایش می‌یابد. توزیع رنگی کسر حجمی پسته برنج و شن سیلیس نشان می‌دهد اکثر حباب‌ها در ناحیه بین دیوارها و مرکز بستر شکل می‌گیرند. هم‌چنین کاهش کسر حجمی در بالای بستر نشان‌دهنده از بین رفتن حباب‌ها می‌باشد. کسر حجمی ذرات در نزدیکی دیوارها به حداکثر مقدار مجاز خود می‌رسند. درحالی‌که در مرکز بستر کسر حجمی ذرات کاهش می‌یابد. این رفتار به دلیل سرعت

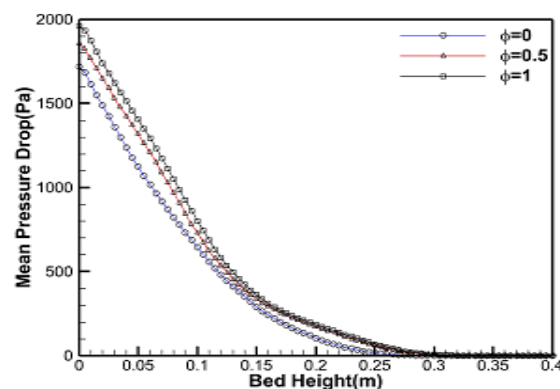
نسبتاً بالای هوای ورودی به بستر و سرعت پایین هوا در دیوارها اتفاق می‌افتد. هم‌چنین مشاهده می‌شود در شرایط لغزش آزاد ($\phi = 0$) کسر حجمی ذرات پسته برنج و شن سیلیس در دیوارها و مرکز بستر نسبت به دو حالت دیگر بیشتر می‌باشد. هم‌چنین با گذشت زمان، ذرات پسته برنج و شن سیلیس به دلیل نیروی گرانش، تمایلشان به رسوب و چسبندگی به کف بستر افزایش می‌یابد و لذا کسر حجمی ذرات پسته برنج و شن سیلیس در کف بستر بیشتر می‌باشد.

بررسی اثر ضریب برخورد آئینه‌ای بر روی افت فشار

بستر سیال. در طراحی سیستم‌های بستر سیال، افت فشار یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار می‌باشد. شکل (۶) افت فشار بستر سیال با ضرایب برخورد آئینه‌ای لغزش آزاد ($\phi = 0$)، لغزش جزئی ($\phi = 0.5$) و بدون لغزش ($\phi = 1$) را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند کمترین افت فشار در شرایط لغزش آزاد ($\phi = 0$) رخ می‌دهد. در شرایط لغزش آزاد، افت فشار به ترتیب ۸/۰۹٪ و ۱۴/۲٪ نسبت به دو حالت لغزش جزئی و بدون لغزش کمتر می‌باشد. در لغزش آزاد ($\phi = 0$) ذرات آزادانه در امتداد دیوار حرکت می‌کنند و تنش برشی میان ذرات و دیوار صفر است. ولی در شرایط بدون لغزش ($\phi = 1$) ذرات به دیواره می‌چسبند و در این حالت مقدار تنش برشی بیشینه است؛ بنابراین با افزایش ضریب برخورد آئینه‌ای تنش برشی افزایش می‌یابد و با افزایش تنش برشی افت فشار نیز افزایش می‌یابد. برای رسیدن به شرایط مطلوب در طراحی راکتور بستر سیال حبابی باید افت فشار کاهش یابد. در این صورت ذرات پسته برنج و شن سیلیس به خوبی مخلوط می‌شوند و توزیع هم‌گونی میان ذرات پسته برنج و شن سیلیس رخ می‌دهد و در نتیجه کیفیت گازهای سنتز شده خروجی از راکتور گازی ساز بستر سیال حبابی افزایش می‌یابد.



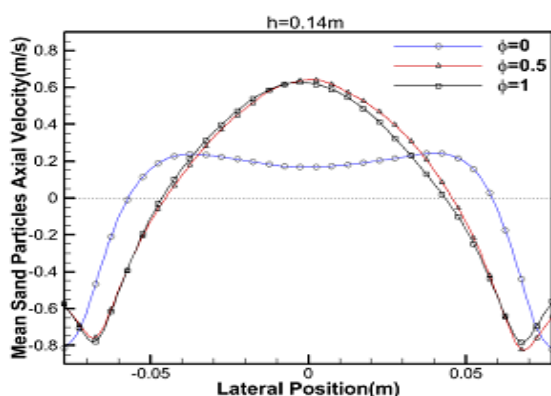
شکل ۵ (الف) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در شرایط لغزش آزاد، (ب) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در شرایط لغزش جزئی، (ج) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در شرایط بدون لغزش، (د) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در شرایط لغزش آزاد، (ه) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در شرایط لغزش جزئی، (و) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در شرایط بدون لغزش



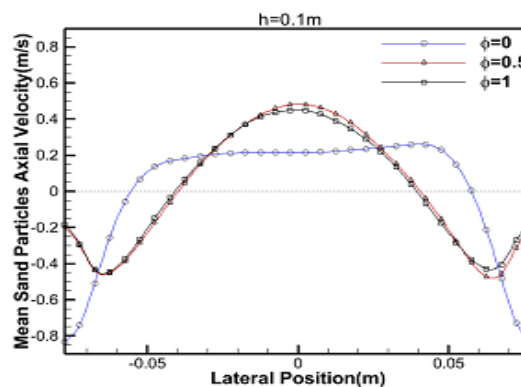
شکل ۶ اثر ضریب برخورد آیینهای بر روی افت فشار در طول امتداد بسترسیال

پسته برنج و شن سیلیس در نزدیکی دیوارها افزایش می‌یابد. این شکل نشان می‌دهد، بیشترین سرعت رو به پایین (سرعت منفی) در شرایط لغزش آزاد ($\phi = 0$) و کمترین سرعت رو به پایین (سرعت منفی) ذرات جامد در شرایط بدون لغزش ($\phi = 0$) (1) اتفاق می‌افتد. در مرکز بستر، حداکثر سرعت رو به بالا (سرعت مثبت) ذرات پسته برنج و شن سیلیس در شرایط لغزش جزئی ($\phi = 0.5$) پیش‌بینی می‌شود. هم‌چنین هر چه به کف بستر نزدیک‌تر شویم، متوسط زمانی سرعت ذرات پسته برنج و شن سیلیس کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود در شرایط ($\phi = 0$) تغییرات شدید سرعت در نواحی مرکز بستر وجود ندارد. شیب تغییرات سرعت در این حالت نسبت به دو حالت دیگر کمتر می‌باشد؛ بنابراین در این حالت اختلاط مناسبی انجام نمی‌شود. لذا هر چه شیب تغییرات سرعت ذرات پسته برنج و شن سیلیس در بستر افزایش یابد، تجمع ذرات پسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال کاهش می‌یابد، بنابراین اختلاط بهتری میان ذرات پسته برنج و شن سیلیس در بستر انجام می‌شود.

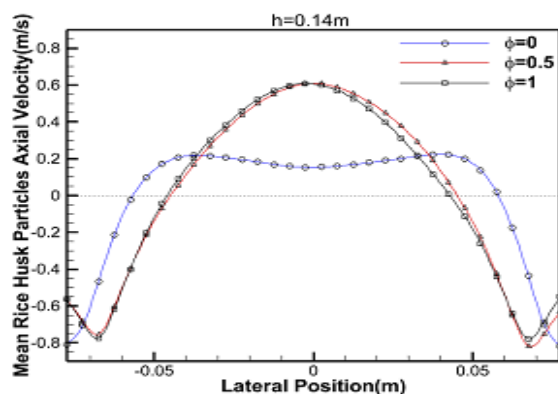
بررسی اثر ضریب برخورد آینه‌ای بر روی توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پسته برنج و شن سیلیس در امتداد محوری بسترسیال. معیار اختلاط شیب منحنی تغییرات سرعت و گرادیان سرعت می‌باشد. هر چه گرادیان سرعت افزایش یابد، اختلاط مخلوط شدن بهتر انجام می‌شود. شکل (۷) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پسته برنج و شن سیلیس را در ارتفاع‌های ۰/۱ متر و ۰/۱۴ متر نسبت به کف بستر نشان می‌دهد. در مرکز بستر، ذرات پسته برنج و شن سیلیس به وسیله هوا حمل می‌شوند و به سمت بالا حرکت می‌کنند و در دیوارهای بستر به سمت پایین حرکت می‌کنند، لذا در این حالت در بسترسیال جریان برگشتی رخ می‌دهد. این رفتار به جز در شرایط لغزش آزاد ($\phi = 0$) اتفاق می‌افتد. پروفیل توزیع متوسط سرعت ذرات پسته برنج و شن سیلیس در شرایط لغزش آزاد ($\phi = 0$) در مرکز و دیوارهای بستر نسبت به دو حالت بدون لغزش ($\phi = 1$) و لغزش جزئی ($\phi = 0.5$) متفاوت می‌باشد. با کاهش ضریب برخورد آینه‌ای، اصطکاک میان ذرات و دیواره کاهش می‌یابد؛ بنابراین با کاهش ضریب برخورد آینه‌ای، سرعت رو به پایین (سرعت منفی) ذرات



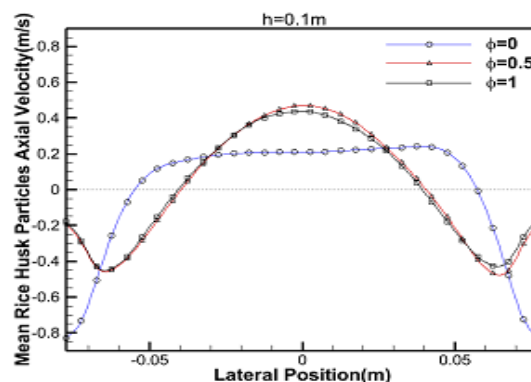
(ب)



(الف)



(د)

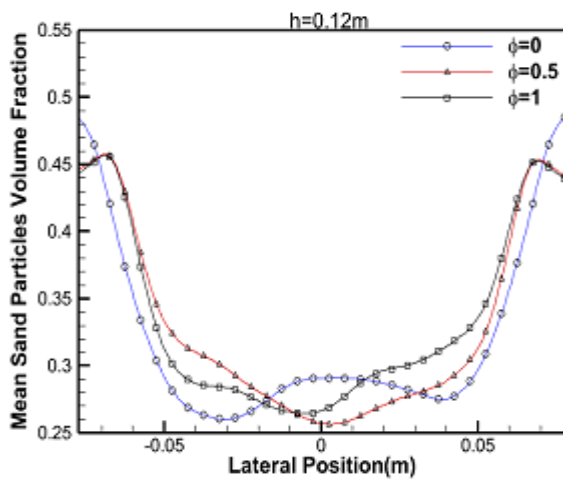


(ج)

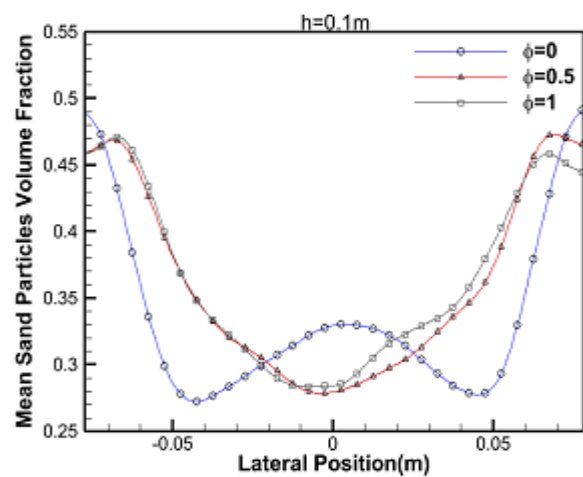
شکل ۷ الف) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات شن سیلیس در ارتفاع ۰/۱ متر، ب) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات شن سیلیس در ارتفاع ۰/۱۴ متر، ج) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پسته برنج در ارتفاع ۰/۱ متر، د) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پسته برنج در ارتفاع ۰/۱۴ متر

لغزش آزاد ($\phi = 0$) نسبت به دو شرط مرزی دیگر بیشتر می باشد. همچنین بیشترین توزیع کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در مرکز بستر در شرایط لغزش آزاد ($\phi = 0$) پیش بینی می شود. با افزایش تجمع ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال، تمایل ذرات به تفکیک و جدایش افزایش می یابد، بنابراین اختلاط ذرات به خوبی انجام نمی شود و ذرات به صورت یکپارچه مخلوط نمی شوند. همچنین مشاهده می شود به دلیل تجمع بیشتر ذرات جامد در دیوارهای بستر در مقایسه با مرکز بستر، کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در دیوارهای بستر بیشتر می باشد.

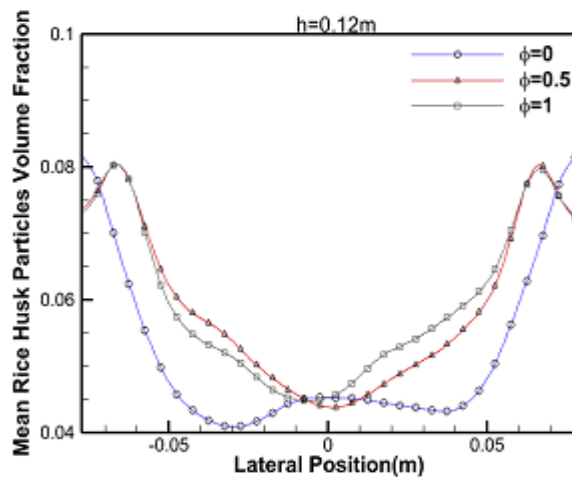
بررسی اثر ضریب برخورد آیینی بر روی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در امتداد محوری بسترسیال. شکل (۸) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس را در ارتفاع های ۰/۱ متر و ۰/۱۲ متر نسبت به کف بستر نشان می دهد. پروفیل توزیع کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در شرایط لغزش آزاد ($\phi = 0$) نسبت به دو حالت دیگر متفاوت می باشد. به این دلیل که ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در شرایط لغزش آزاد ($\phi = 0$) به راحتی در امتداد دیوارها به سمت پایین حرکت می کنند و دارای سرعت رو به پایین (سرعت منفی) بیشتری می باشند، لذا کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در حوالی دیوارها در شرایط



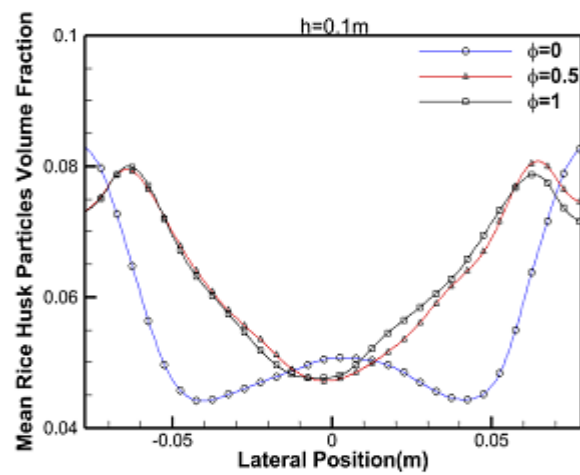
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸ (الف) توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در ارتفاع ۰/۱ متر، (ب) توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در ارتفاع ۰/۱۲ متر، (ج) توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در ارتفاع ۰/۱ متر، (د) توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در ارتفاع ۰/۱۲ متر

شیب تغییرات سرعت در این حالت نسبت به دو حالت دیگر بیشتر می باشد، بنابراین اختلاط مناسب تری در این حالت نسبت به دو ضریب برخورد دیگر انجام می شود. مقدار اختلاط در حالتی که ضریب برخورد $0/6$ باشد نسبت به هنگامی که ضریب برخورد بین ذرات $0/7$ باشد حدود $8/5\%$ و نسبت به حالتی که ضریب برخورد بین ذرات $0/9$ باشد حدود $8/2\%$ افزایش می یابد. هم چنین کسر حجمی ذرات پسته برنج (زیست توده) در مقایسه با شن سیلیس (ماده بستر) ناچیز می باشد که نشان دهنده وجود پدیده تفکیک قوی در فرایند سیالیت ذرات است. با افزایش ضریب برخورد، تجمع ذرات شن در کف بستر بیشتر می شود. تجمع ذرات پسته برنج در ارتفاع بالاتری نسبت به کف بستر رخ می دهد و با افزایش ضریب برخورد نیز تجمع ذرات پسته برنج افزایش می یابد. هم چنین بیشترین تجمع کسر حجمی ذرات پسته برنج و شن سیلیس در دیوارها و کف بستر اتفاق می افتد.

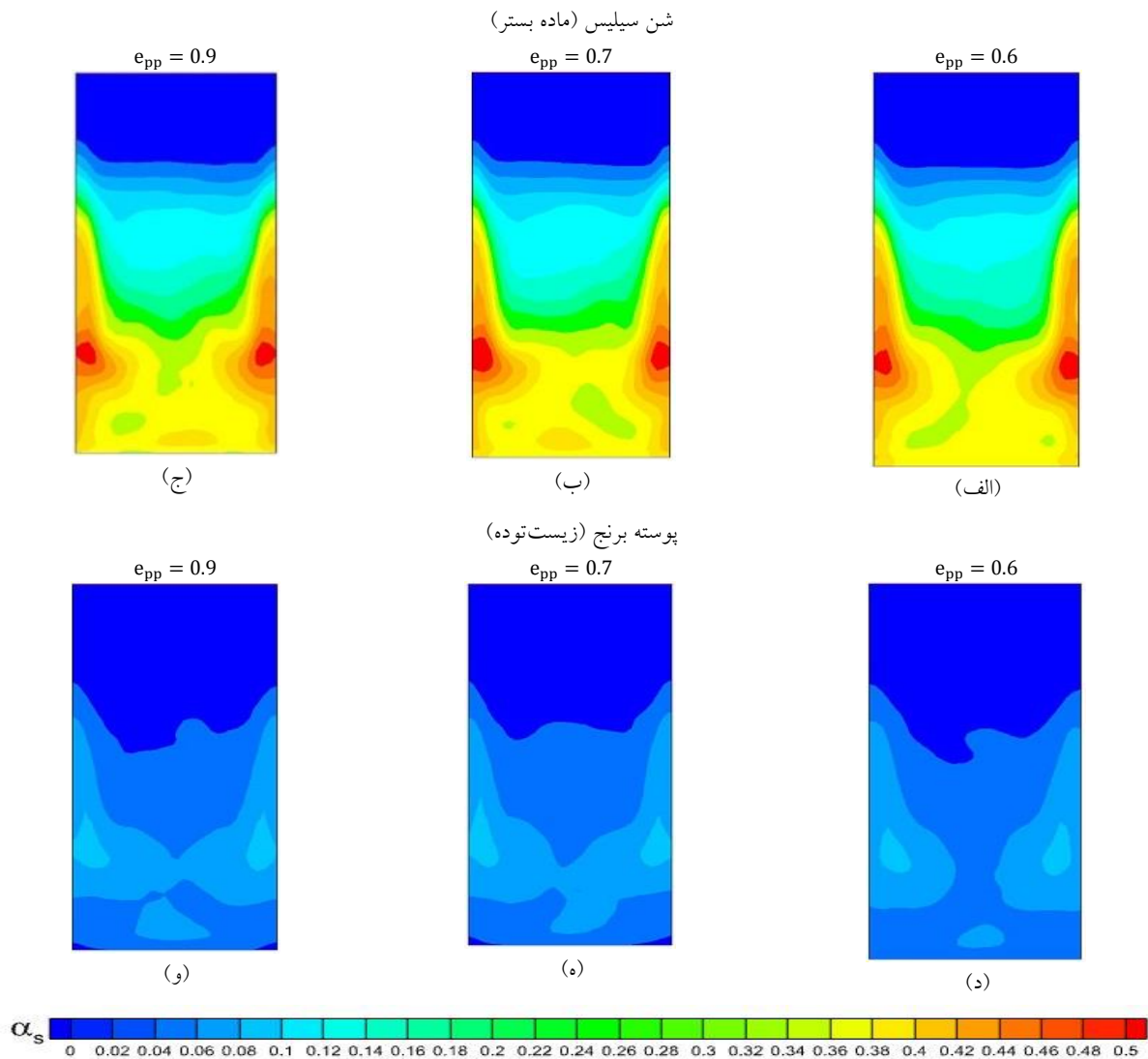
بررسی اثر ضریب برخورد بر روی افت فشار بسترسیال. شکل (۱۰) افت فشار بسترسیال با ضرایب مختلف برخورد ذرات را نشان می دهد. در نتیجه این بررسی مشاهده می شود، با افزایش ضریب برخورد بین ذرات پسته برنج و شن سیلیس، افت فشار نیز در بستر افزایش می یابد. هر چه ضریب برخورد افزایش پیدا کند، برخوردهای الاستیک نیز افزایش پیدا می کند. در نتیجه، اضمحلال انرژی مکانیکی ناشی از برخورد ذرات کاهش می یابد؛ بنابراین ذرات تمایلشان به جدایش از یکدیگر افزایش می یابد و اختلاط مناسبی میان ذرات پسته برنج و شن سیلیس انجام نمی شود. هم چنین با تفکیک و جدایش ذرات پسته برنج و شن سیلیس فضای خالی در بستر کاهش می یابد. این امر باعث افزایش افت فشار در بستر می شود. در شرایطی که ضریب برخورد بین ذرات $0/9$ باشد، افت فشار به ترتیب $13/8\%$ و $7/5\%$ درصد نسبت به شرایطی که ضریب برخورد $0/6$ و $0/7$ باشد افزایش می یابد.

بررسی اثر ضریب برخورد ذرات بر روی رفتار اختلاط پسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال حبایی. ضریب برخورد بین فازهای جامد نشان دهنده فعل و انفعالات ذرات در بسترسیال می باشد. ضریب برخورد باعث تغییرات ممتد و نوسانات انرژی در طول فعل و انتقالات بین فازها می شود. ضریب برخورد بر روی لزجت توده ای، فشار جامد و تنش برشی فاز جامد تأثیرگذار می باشد. در این پژوهش، سه نوع پسته برنج انتخاب شده است. سه ضریب برخورد بین ذرات پسته برنج (زیست توده) و شن سیلیس (ماده بستر) بر روی رفتار اختلاط پسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال حبایی بررسی شده است. در این بررسی از ضریب لغزش جزئی برای هر دو فاز جامد استفاده شده است. سرعت ورودی هوا، کسر حجمی و چگالی ذرات ثابت فرض شده است. جدول (۲) ضرایب برخورد بین ذرات را نشان می دهد.

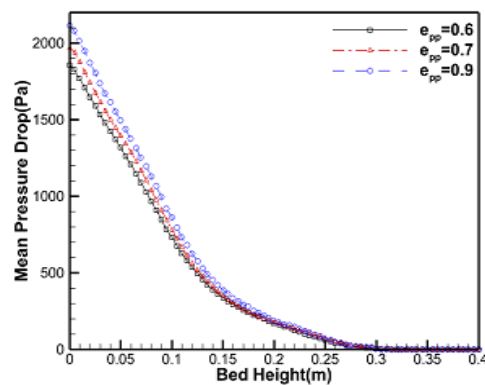
جدول ۲ ضرایب برخورد بین ذرات جامد

ضریب برخورد بین (شن- شن)	ضریب برخورد بین (پسته برنج- پسته برنج)	ضریب برخورد بین (پسته برنج- شن)
۰/۹	۰/۶	۰/۶
۰/۹	۰/۷	۰/۷
۰/۹	۰/۹	۰/۹

بررسی اثر ضریب برخورد بر روی توزیع رنگی کسر حجمی ذرات پسته برنج و شن سیلیس. شکل (۹) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی پسته برنج و شن سیلیس را برای سه ضریب برخورد ($0/6$ ، $0/7$ و $0/9$) نشان می دهد. مشاهده می شود، متوسط کسر حجمی شن سیلیس (ماده بستر) در ورودی بسترسیال در مقایسه با پسته برنج (زیست توده) بیشتر می باشد که نشان دهنده سیالیت پایین شن سیلیس به دلیل سنگین بودن آن می باشد. هر چه مقدار ضریب برخورد ذرات کاهش یابد، اضمحلال انرژی مکانیکی به دلیل افزایش برخورد غیر الاستیک ذرات افزایش می یابد؛ بنابراین ذرات پسته برنج و شن سیلیس به خوبی با هم مخلوط می شوند. همان طور که اشاره شد معیار اختلاط، شیب منحنی تغییرات سرعت و گرادیان سرعت می باشد. شکل (۹) نشان می دهد در حالتی که ضریب برخورد بین ذرات $0/6$ باشد،

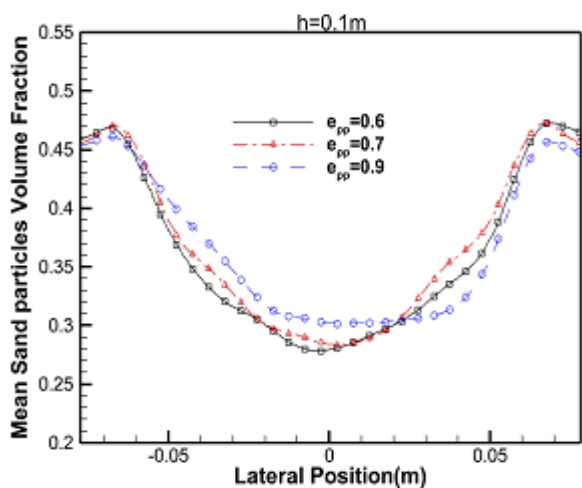


شکل ۹ (الف) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در شرایط ضریب برخورد 0.6 ، (ب) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در شرایط ضریب برخورد 0.7 ، (ج) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در شرایط ضریب برخورد 0.9 ، (د) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در شرایط ضریب برخورد 0.6 ، (ه) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در شرایط ضریب برخورد 0.7 ، (و) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در شرایط ضریب برخورد 0.9

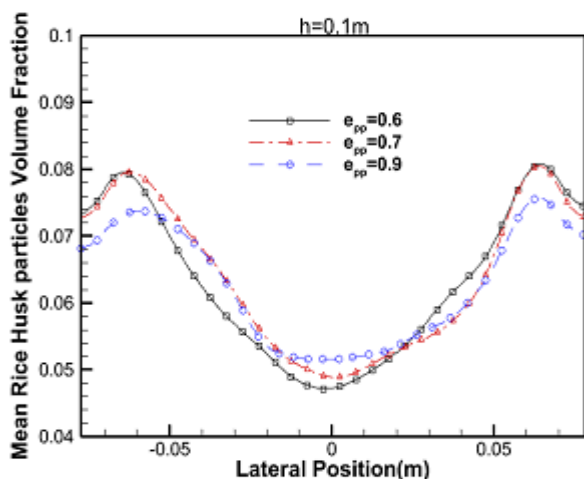


شکل ۱۰ اثر ضریب برخورد آیینیه‌ای بر روی افت فشار در طول امتداد بسترسیال

چه از سمت دیوارهای بستر به سمت مرکز بستر حرکت کنیم کسر حجمی ذرات پسته برنج و شن سیلیس کاهش می‌یابد. با کاهش ضریب برخورد، اتلاف ممتد افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، سرعت ذرات پسته برنج و شن سیلیس افزایش می‌یابد و تجمع ذرات در مرکز بستر کاهش و در دیوارها افزایش می‌یابد. لذا، هنگامی که ضریب برخورد بین ذرات جامد $0/6$ باشد، بیشترین متوسط زمانی کسر حجمی در دیوارهای بستر و کمترین متوسط کسر حجمی ذرات جامد در مرکز بستر پیش‌بینی می‌شود. همچنین با افزایش ارتفاع نسبت به کف بستر، کسر حجمی ذرات افزایش می‌یابد.



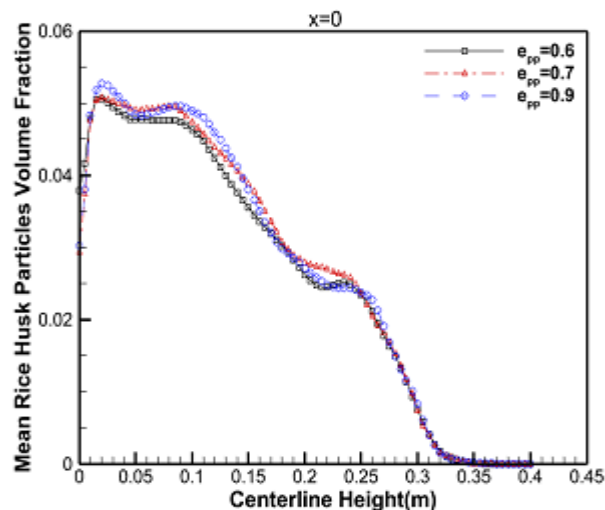
(الف)



(ب)

شکل ۱۲ (الف) متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در جهت امتداد شعاعی در ارتفاع $0/1$ متر، (ب) متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پسته برنج در جهت امتداد شعاعی در ارتفاع $0/1$ متر

بررسی اثر ضریب برخورد بر روی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پسته برنج در امتداد ارتفاع بستر. شکل (۱۱) توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پسته برنج را برای سه ضریب برخورد ($0/6$ ، $0/7$ و $0/9$) در امتداد ارتفاع مرکز بستر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با کاهش ضریب برخورد، ارتفاع بستر افزایش می‌یابد و متوسط کسر حجمی ذرات پسته برنج کاهش می‌یابد. همچنین در ابتدا کسر حجمی ذرات پسته برنج در امتداد ارتفاع بستر افزایش اندکی را نشان می‌دهد. به علت اثرات سرعت هوای ورودی این اتفاق روی می‌دهد. سپس کسر حجمی ذرات به تدریج کاهش می‌یابد. در نزدیکی محل اتصال بخش پایین و بالای بستر، کاهش کسر حجمی پسته برنج با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد و با رسیدن به منطقه آزاد کسر حجمی ذرات پسته برنج به صفر می‌رسد.

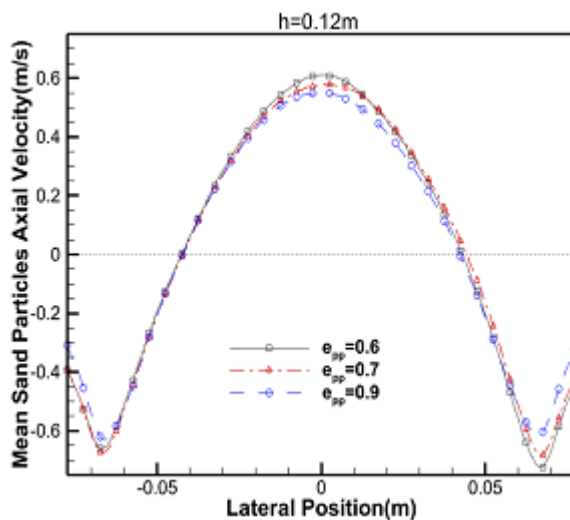


شکل ۱۱ اثر ضریب برخورد بر روی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پسته برنج در امتداد ارتفاع بستر

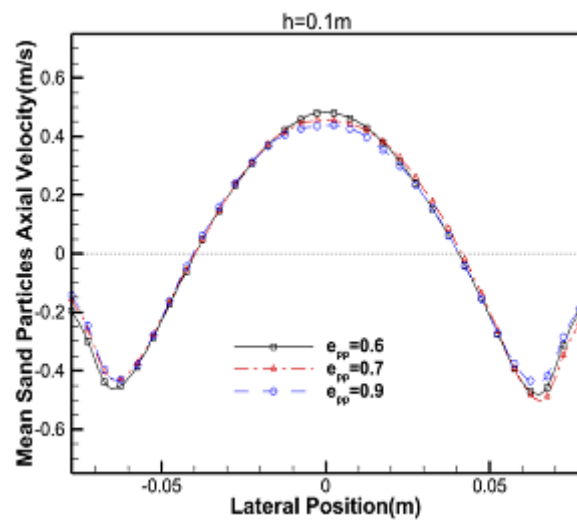
بررسی اثر ضریب برخورد بر روی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پسته برنج و شن سیلیس در امتداد محوری بستر سیال. شکل (۱۲) توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پسته برنج و شن سیلیس را برای سه ضریب برخورد ($0/6$ ، $0/7$ و $0/9$) در ارتفاع $0/1$ متر نسبت به کف بستر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، بیشترین کسر حجمی ذرات پسته برنج و شن سیلیس در نزدیکی دیوارها به دلیل تجمع ذرات رخ می‌دهد. هر

و به سمت بالا حرکت می‌کنند؛ بنابراین در حوالی دیوارها با توجه به منفی بودن سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس جریان برگشتی رخ می‌دهد. با کاهش ضریب برخورد، سرعت رو به بالا (سرعت مثبت) و سرعت رو به پایین (سرعت منفی) ذرات افزایش می‌یابد. با کاهش ضریب برخورد، متوسط سرعت ذرات شن سیلیس و پوسته برنج افزایش یافته و ذرات تمایلشان به چسبندگی و اختلاط افزایش می‌یابد. در نتیجه هر چه ضریب برخورد کاهش یابد توزیع یک‌نواخت‌تری میان ذرات پوسته برنج و شن سیلیس انجام می‌شود.

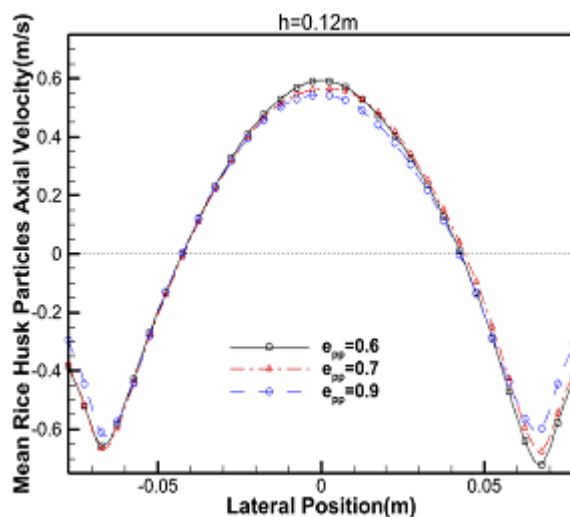
بررسی اثر ضریب برخورد بر روی توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در امتداد محوری بسترسیال.
 شکل (۱۳) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس را برای سه ضریب برخورد (۰/۹ و ۰/۷ و ۰/۶) در ارتفاع‌های ۰/۱ متر و ۰/۱۲ متر نسبت به کف بستر نشان می‌دهد. پروفیل توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات برای پوسته برنج و شن سیلیس مشابه می‌باشد. مشاهده می‌شود در تمامی ضرایب برخورد، در نزدیکی دیوارها ذرات دارای سرعت رو به پایین (سرعت منفی) هستند و به سمت پایین حرکت می‌کنند و در ناحیه مرکز بستر ذرات دارای سرعت رو به بالا (سرعت مثبت) هستند



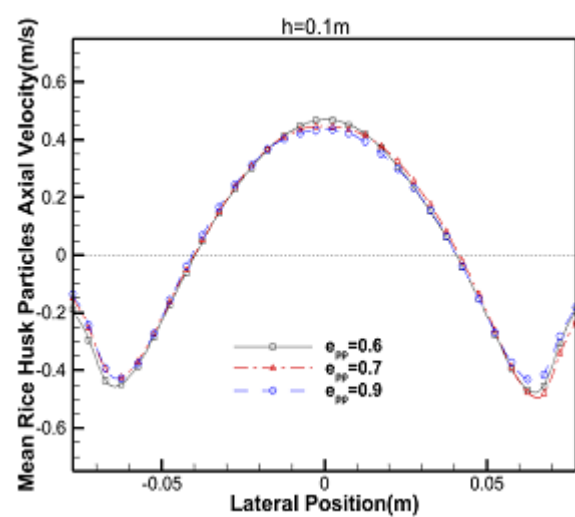
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۳ (الف) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات شن سیلیس در ارتفاع ۰/۱ متر، (ب) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات شن سیلیس در ارتفاع ۰/۱۲ متر، (ج) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج در ارتفاع ۰/۱ متر، (د) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج در ارتفاع ۰/۱۲ متر

نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی اثرات شرایط مرزی دیوار برای فازهای جامد و ضریب برخورد بین ذرات جامد پوسته برنج و شن سیلیس بر روی فرایند اختلاط زیست توده (پوسته برنج) و ماده بستر (شن سیلیس) در بسترسایال حبابی به کمک رویکرد چند فازي اوپلرین به همراه تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای پرداخته شده است. در این پژوهش توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس، توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس و افت فشار مطالعه شده است. به منظور مطالعه اثر ضریب برخورد آینه‌ای، سه ضریب برخورد لغزش آزاد ($\phi = 0$)، لغزش جزئی ($\phi = 0.5$) و بدون لغزش ($\phi = 1$) بررسی شده است. در نتیجه این مطالعه، در شرایط لغزش آزاد ($\phi = 0$) کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در دیوارها و مرکز بستر نسبت به دو حالت لغزش جزئی و بدون لغزش بیشتر می‌باشد. هم‌چنین با افزایش ضریب برخورد آینه‌ای افت فشار نیز افزایش می‌یابد. لذا، بیشترین افت فشار در شرایط بدون لغزش ($\phi = 1$) پیش‌بینی می‌شود. پروفیل توزیع متوسط سرعت و کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در شرایط لغزش آزاد ($\phi = 0$) نسبت به دو حالت بدون لغزش ($\phi = 1$) و لغزش جزئی ($\phi = 0.5$) متفاوت می‌باشد. در شرایط لغزش جزئی، بیشترین سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس مشاهده می‌شود. در نتیجه، هر چه مقدار سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس افزایش یابد، اختلاط یک‌نواخت‌تری میان ذرات پوسته برنج و شن سیلیس رخ می‌دهد. در ادامه این پژوهش به بررسی اثر ضریب برخورد ذرات با یکدیگر پرداخته شد. برای جهت انجام این مطالعه، ضریب برخورد ذرات شن- شن ۰/۹ و به صورت ثابت و ضرایب برخورد ذرات شن- پوسته برنج و پوسته برنج- پوسته برنج به ترتیب ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۹ در نظر گرفته شد. در نتیجه این مطالعه، با افزایش ضریب برخورد، متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب برخورد بین ذرات، افت فشار نیز در بسترسایال افزایش می‌یابد. هر چه مقدار ضریب برخورد ذرات افزایش یابد، کسر حجمی ذرات در نزدیکی دیوارها کاهش و در مرکز بستر افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب برخورد، متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در مرکز بستر کاهش می‌یابد. هم‌چنین مشاهده شد با کاهش ضریب برخورد، سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس و هم‌چنین برخوردهای غیر الاستیک افزایش می‌یابد. در نتیجه اضمحلال انرژی مکانیکی

ناشی از برخورد ذرات پوسته برنج و شن سیلیس افزایش می‌یابد؛ بنابراین در این حالت، اختلاط ذرات پوسته برنج و شن سیلیس افزایش می‌یابد.

واژه نامه

Euler-Euler	اوپلر- اوپلری
Euler-Lagrange	اوپلر- لاگرانژ
Solid Pressure	فشار جامد
Shear Stress	تنش برشی
Kinetic Theory of Granular Flow	تئوری انرژی جنبشی جریان دانه‌ای
The Energy Minimization Multi-Scale	کمینه‌سازی انرژی چند مقیاسی
Green Gauss Cell Based	مدل گاووس
Specularity Coefficient	ضریب برخورد آینه‌ای
Restitution Coefficient	ضریب برخورد بین ذرات
Drag Model	مدل پسا
Gidaspow	گیداسپاو
Hill-Koch-Land	هیل- کوچ- لند
K-e RNG	کا- اِپسیلون- آر- ان- جی
Ergun	ارگان
Wen-Yu	ون- یو
Syamlal-Obrien	شمالال- ابراین
Radial Distribution Function	تابع توزیع شعاعی
Shear Viscosity	لزجت برشی
Bulk Viscosity	لزجت توده‌ای
Collisional Viscosity	لزجت برخورد
Kinematic Viscosity	لزجت جنبشی
Coupling	هم‌بسته‌کردن
Second Order Implicit Scheme	مرتبه دوم ضمنی
No Slip	بدون لغزش
Lift Force	نیروی برا
Virtual Mass Force	نیروی جرم مجازی

مراجع

1. Demirbas, M. F., Balat, M., and Balat, H., "Potential Contribution of Biomass to the Sustainable Energy Development", *Energy Conversion and Management*, Vol.50, No.5, Pp. 1746-1760, (2009).
2. Rao, T.R., and Bheemarasetti, J.R., "Minimum Fluidization Velocities of Mixtures of Biomass and Sands", *Energy*, Vol. 26, No. 2, Pp. 633-644, (2001).
3. Abdullah, M.Z., Husain, Z., and Pong, S.Y., "Analysis of Cold Flow Fluidization Test Results for Various Biomass Fuels", *Biomass and Bioenergy*, Vol. 24, No. 6, Pp. 487-494, (2003).
4. Clarke, K.L., Pugsley, T., and Hill, G.A., "Fluidization of Moist Sawdust in Binary Particle Systems in a Gas-Solid Fluidized Bed", *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No.24, Pp. 6909-6918, (2005).
5. Zhong, W., Jin, B., Zhang, Y., Wang, X., and Xiao, R., "Fluidization of Biomass Particles in a Gas-Solid Fluidized Bed", *Energy & Fuels*, Vol. 22, No. 6, Pp. 4170-4176, (2008).
6. Cui, H., and Grace, J.R., "Fluidization of Biomass Particles: A Review of Experimental Multiphase Flow Aspects", *Chemical Engineering Science*, Vol. 62, No. 1-2, Pp. 45-55, (2007).
7. Qiaoqun, S., Huilin, L., Wentie, L., Yurong, H., Lidan, Y., and Gidaspow, D., "Simulation and Experiment of Segregating/mixing of Rice Husk-Sand Mixture in a Bubbling Fluidized Bed", *Fuel*, Vol. 84, No. 14-15, Pp. 1739-1748, (2005).
8. Xie, L., Zhu, J., and Jiang, C., "Quantitative Study of Mixing/Segregation Behaviors of Binary-Mixture Particles in Pilot-Scale Fluidized Bed Reactor", *Powder Technology*, Vol. 377, Pp. 103-114, (2021).
9. Hameed, S., Sharma, A., and Pareek, V., "Modelling of Particle Segregation in Fluidized Beds", *Powder Technology*, Vol. 353, Pp. 202-218, (2019).
10. Anicic, B., Lu, B., Lin, W., Wu, H., Dam-Johansen, K., and Wang, W., "CFD Simulation of Mixing and Segregation of Binary Solid Mixtures in a Dense Fluidized Bed", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 98, No. 1, Pp. 412-420, (2020).
11. Karami, S., Goharizi, A.S., Abolpour, B., and Darijani, S., "Numerical Study of the Particles Segregation Phenomenon in the Fluidized Beds", *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, (2019).
12. Khezri, R., Wan Ab Karim Ghani, W.A., Masoudi Soltani, S., Awang Biak, D.R., Yunus, R., Silas, K., Shahbaz, M., and Rezaei Motlagh, S., "Computational Fluid Dynamics Simulation of Gas-Solid Hydrodynamics in a Bubbling Fluidized-Bed Reactor: Effects of Air Distributor, Viscous and Drag Models", *Processes*, Vol. 7, No. 8, Pp. 524, (2019).
13. Wang, L., Xie, X., Wei, G., and Li, R., "Numerical Simulation of Hydrodynamic Characteristics in a Gas-Solid Fluidized Bed", *Particulate Science and Technology*, Vol. 35, No. 2, Pp. 177-182, (2017).
14. Varghese, M.M., and Vakamalla, T.R., "Effect of Turbulence Model on the Hydrodynamics of Gas-solid Fluidized Bed", *Recent Trends in Fluid Dynamics Research*, Pp. 47-61, Springer, Singapore, (2022).
15. Upadhyay, M., Kim, A., Kim, H., Lim, D., and Lim, H., "An Assessment of Drag Models in Eulerian-Eulerian Cfd Simulation of Gas-Solid Flow Hydrodynamics in Circulating Fluidized bed Riser", *ChemEngineering*, Vol. 4, Pp. 37, (2020).

16. Lahlaoui, M.L., and Kharbouch, B., "CFD-Simulation of Gas-Solid Flow in Bubbling Fluidized Bed Reactor", *E3S Web of Conferences*, Vol. 336, Pp. 59-67, EDP Sciences, (2022).
17. Zinani, F., Philippsen, C.G., and Indrusiak, M.L.S., "Numerical Study of Gas-Solid Drag Models in a Bubbling Fluidized Bed", *Particulate Science and Technology*, Vol. 36, No. 1, Pp. 1-10, (2018).
18. Guo, Y., Deng, B., Ge, D., and Shen, X., "CFD Simulation on Hydrodynamics in Fluidized Beds: Assessment of Gradient Approximations and Turbulence Models", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 8, Pp. 1067-1074, (2015).
19. Verma, V., Padding, J.T., Deen, N.G., and Kuipers, J.A.M., "Effect of Bed Size on Hydrodynamics in 3- D Gas-Solid Fluidized Beds", *AIChE Journal*, Vol. 61, No. 5, Pp. 1492-1506, (2015).
20. Wang, L., Du, X., Sun, J., Xie, X., and Duan, S., "A Comparative Study on the Drag Model Applicability and Influence of Fluidized Velocity on Hydrodynamics of Fluidized Bed", *12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Pp. 1-5, IEEE, (2020).
21. Aiche, F., Belaadi, S., Lalaoua, A., Berrouk, A.S., and Azzi, A., "Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Investigation of Hydrodynamics Behaviour of Gas-Solid Flow in Fluidized Bed of Geldart D Particles", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 235, No. 4, Pp. 1005-1016, (2021).
22. Chapman, S., and Cowling, T.G., "The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases: An Account of the Kinetic Theory of Viscosity, Thermal Conduction and Diffusion in Gases", Cambridge university press., (1990).
23. Du, W., Bao, X., Xu, J., and Wei, W., "Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling of Spouted Bed: Assessment of Drag Coefficient Correlations", *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, No. 5, Pp. 1401-1420, (2006).
24. Li, T., and Guenther, C., "A CFD Study of Gas-Solid Jet in a CFB Riser Flow", *AIChE Journal*, Vol. 58, No. 3, Pp. 756-769, (2012).
25. Wang, J., "Flow Structures inside a Large-Scale Turbulent Fluidized Bed of FCC Particles: Eulerian Simulation with an EMMS-Based Sub-Grid Scale Model", *Particuology*, Vol. 8, No.2, Pp. 176-185, (2010).
26. Xue, Q., Heindel, T.J., and Fox, R.O., "A CFD Model for Biomass Fast Pyrolysis in Fluidized-Bed Reactors", *Chemical Engineering Science*, Vol. 66, No. 11, Pp. 2440-2452, (2011).
27. Armstrong, L.M., Gu, S., and Luo, K.H., "Study of Wall-to-Bed Heat Transfer in a Bubbling Fluidised Bed Using the Kinetic Theory of Granular Flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 21-22, Pp. 4949-4959, (2010).
28. Goldschmidt, M.J.V., Kuipers, J.A.M., and van Swaaij, W.P.M., "Hydrodynamic Modelling of Dense Gas-Fluidised Beds Using the Kinetic Theory of Granular Flow: Effect of Coefficient of Restitution on Bed Dynamics", *Chemical Engineering Science*, Vol. 56, No. 2, Pp. 571-578, (2001).
29. Jung, J., Gidaspow, D., and Gamwo, I.K., "Bubble Computation, Granular Temperatures, and Reynolds Stresses", *Chemical Engineering Communications*, Vol. 193, No. 8, Pp. 946-975, (2006).
30. Wang, X.Y., Jiang, F., Xu, X., Fan, B.G., Lei, J., and Xiao, Y.H., "Experiment and CFD Simulation of Gas-Solid Flow in the Riser of Dense Fluidized Bed at High Gas Velocity", *Powder Technology*, Vol. 199, No. 3, Pp. 203-212, (2010).

31. Sasic, S., Johnsson, F., and Leckner, B., "Inlet Boundary Conditions for the Simulation of Fluid Dynamics in Gas-Solid Fluidized Beds", *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, No. 16, Pp. 5183-5195, (2006).
32. Van Wachem, B.G.M., Schouten, J.C., Van den Bleek, C.M., Krishna, R., and Sinclair, J.L., "Comparative Analysis of CFD Models of Dense Gas-Solid Systems", *AIChE Journal*, Vol. 47, No. 5, Pp. 1035-1051, (2001).
33. Wang, J., Ge, W., and Li, J., "Eulerian Simulation of Heterogeneous Gas-Solid Flows in CFB Risers: EMMS-Based Sub-Grid Scale Model with a Revised Cluster Description", *Chemical Engineering Science*, Vol. 63, No. 6, Pp. 1553-1571, (2008).
34. Yang, N., Wang, W., Ge, W., Wang, L., and Li, J., "Simulation of Heterogeneous Structure in a Circulating Fluidized-Bed Riser by Combining the Two-Fluid Model with the EMMS Approach", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 43, No. 18, Pp. 5548-5561, (2004).
35. Kshetrimayum, K.S., Park, S., Han, C., and Lee, C.J., "EMMS Drag Model for Simulating a Gas-Solid Fluidized Bed of Geldart B Particles: Effect of Bed Model Parameters and Polydispersity", *Particuology*, Vol. 51, Pp. 142-154, (2020).
36. Fede, P., Simonin, O., and Ingram, A., "3D Numerical Simulation of a Lab-Scale Pressurized Dense Fluidized Bed Focussing on the Effect of the Particle-Particle Restitution Coefficient and Particle-Wall Boundary Conditions", *Chemical Engineering Science*, Vol. 142, Pp. 215-235, (2016).
37. Abdelmotalib, H.M., and Im, I.T., "Simulation Study of the Effect of the Restitution Coefficient on Interphase Heat Transfer Processes and Flow Characteristics in a Fluidized Bed", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 75, No. 12, Pp. 841-854, (2019).
38. Kotoky, S., Dalal, A., and Natarajan, G., "Effects of Specularity and Particle-Particle Restitution Coefficients on the Hydrodynamic Behavior of Dispersed Gas-Particle Flows through Horizontal Channels", *Advanced Powder Technology*, Vol. 29, No.4, Pp. 874-889, (2018).
39. Huilin, L., Yurong, H., and Gidaspow, D., "Hydrodynamic Modelling of Binary Mixture in a Gas Bubbling Fluidized Bed Using the Kinetic Theory of Granular Flow", *Chemical Engineering Science*, Vol. 58, No.7, Pp. 1197-1205, (2003).
40. Taghipour, F., Ellis, N., and Wong, C., "Experimental and Computational Study of Gas-Solid Fluidized Bed Hydrodynamics", *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No. 24, Pp. 6857-6867, (2005).
41. Anderson, T.B., and Jackson, R., "Fluid Mechanical Description of Fluidized Beds. Equations of Motion", *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 6, No. 4, Pp. 527-539, 1967.
42. Bowen, R.M., "Theory of Mixtures", *Continuum physics.*, (1976).
43. "ANSYS Fluent Theory Guide 12.0", *ANSYS. Inc.*, (2009).
44. Ding, J., and Gidaspow, D., "A Bubbling Fluidization Model Using Kinetic Theory of Granular Flow", *AIChE Journal*, Vol. 36, No. 4, Pp. 523-538, (1990).
45. Gidaspow, D., Bezburuah, R., and Ding, J., "Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds: Kinetic Theory Approach", *Illinois Inst. of Tech, United States*, (1991).

46. Wen, C.Y., "Mechanics of Fluidization", *Chemical engineering progress symposium series.*, Vol. 62, Pp. 100-111, (1966).
47. Ergun, S., "Fluid Flow through Packed Columns", *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 48, Pp. 89-94, (1952).
48. Richardson, J.T., "Sedimentation and Fluidisation: Part I", *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 32, Pp. 35-53, (1954).
49. Syamlal, M., "The Particle-Particle Drag Term in a Multiparticle Model of Fluidization", *EG and G Washington Analytical Services Center, Inc.*, Morgantown, USA, (1987).
50. Ogawa, S., Umemura, A., and Oshima, N., "On the Equations of Fully Fluidized Granular Materials", *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP*, Vol. 31, No. 4, Pp. 483-493, (1980).
51. Syamlal, M., Rogers, W., and O'Brien, T.J., "MFIx Documentation Theory Guide", USDOE Morgantown Energy Technology Center, United States, (1993).
52. Lun, C.K.K., Savage, S.B., Jeffrey, D.J., and Chepurniy, N., "Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flowfield", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 140, Pp. 223-256, (1984).
53. Johnson, P.C., and Jackson, R., "Frictional-Collisional Constitutive Relations for Granular Materials, with Application to Plane Shearing", *Journal of fluid Mechanics*, Vol. 176, Pp. 67-93, (1987).
54. Kuwagi, K., Utsunomiya, H., Shimoyama, Y., Hirano, H., and Takami, T., "Direct Numerical Simulation of Fluidized Bed with Immersed Boundary Method", (2010).
55. Hoomans, B.P.B., "Granular Dynamics of Gas-Solid Two-Phase Flows", Universiteit Twente., (2000).
56. Peltola, J., "Dynamics in a Circulating Fluidized Bed: Experimental and Numerical Study", (2009).
57. Sharma, A., Wang, S., Pareek, V., Yang, H., and Zhang, D., "CFD Modeling of Mixing/Segregation Behavior of Biomass and Biochar Particles in a Bubbling Fluidized Bed", *Chemical Engineering Science*, Vol. 106, Pp. 264-274, (2014).
58. Ge, J., and Monroe, C.A., "The Effect of Coefficient of Restitution in Modeling of Sand Granular Flow for Core Making: Part I Free-Fall Experiment and Theory", *International Journal of Metalcasting*, Vol. 13, No. 4, Pp. 753-767, (2019).
59. Ahmad, N., Tong, Y., Lu, B., and Wang, W., "Extending the EMMS-Bubbling Model to Fluidization of Binary Particle Mixture: Parameter Analysis and Model Validation", *Chemical Engineering Science*, Vol. 200, Pp. 257-267, (2019).
60. Parvathaneni, S., and Buwa, V.V., "Eulerian Multifluid Simulations of Segregation and Mixing of Binary Gas-Solids Flow of Particles with Different Densities", *Chemical Engineering Science*, Vol. 245, Pp. 116901, (2021).
61. Gorin, A., Chok, V., Wee, S., and Chua, H., "Hydrodynamics of Binary Mixture Fluidization in a Compartmented Fluidized Bed", *18th International Congress of Chemical and Process Engineering.*, Chemical Equipment Design and Automation, (2008).
62. Wang, H., and Zhong, Z., "A Mixing Behavior Study of Biomass Particles and Sands in Fluidized Bed Based on CFD-DEM Simulation", *Energies*, Vol. 12, No. 9, Pp. 1801, (2019).

Identifying the Electromagnetic Linear Motor Parameters for Producing Inertial Force Using ARM Microcontroller*

Research Article

Mehran Mozaffari-Jovein¹
Seyyed Alireza Davodi-Navokh²
Behnam Moetakef-Imani³

1. Introduction

One of the methods of force generation in actuators is the use of magnetic force obtained from two fixed and moving coils, which is the basis of the operation of electromagnetic actuators. One of the most famous types of these actuators is VCM, which is also called an electromagnetic motor. The difference between these actuators and others is their very high output acceleration, which creates a high response speed and implements the input command signal with good accuracy. To control the output force of the magnetic actuator, it is necessary to first perform an identification test on the dynamic system, in which the chirp variable frequency signal is used as an input or reference signal to evaluate the behavior of the actuator at different frequency values. In the process of generating the identification signal by the STM32F746ZG card to increase the data rate of the digital-to-analog converter, the direct memory access unit related to the card is set up, which causes the data to be transferred in real-time from the memory to the digital-to-analog converter. The review of the previous researches in the field of actuators indicates the diversity of experiments for achieving more precise control of the output force of the actuator, but in most of these cases, the problem of identifying the dynamic parameters of the actuator and the way of generating the desired reference signal with control cards has not been specifically explained.

2. Test setup

As in Figure 1, in the test platform designed to identify the dynamic parameters of the actuator, a dynamometer manufactured by the Swiss company KISTLER was used to measure dynamic forces, which has the ability to measure force in three axes. Due to the low output voltage level of the dynamometer, it is necessary to use a signal amplifier related to the mentioned sensor. The actuator tested in this research was an electromagnetic type with a force capacity of 100 newtons and a wide frequency bandwidth of 4 kHz. The STM32 card in this research setup plays the role of generating the signal needed for

identification. The programming done on the mentioned card provides the ability to generate signals such as sine, triangle, square, and chirp signal with the help of the card's digital to analog converter.

The purpose of the identification test in this research is to identify the dynamic model of the VCM actuator along with the weight attached to it. By placing weights of 146, 354, 425 grams on the actuator and performing an identification test for each weight, a suitable conversion function is obtained.

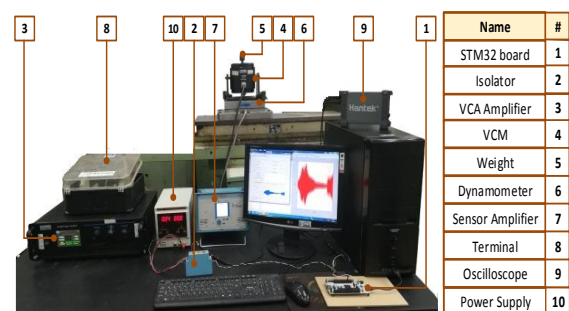


Figure 1. Test setup for actuator identification

3. Identification test

A chirp signal is used to stimulate the electromagnetic actuator. These signals linearly sweep the range 60 to 160 Hz with a frequency step of 1 Hz in a period of 3 seconds. In order to generate the excitation signal, the STM32 card digital-to-analog converter was used along with the direct memory access (DMA) unit. The data acquisition process was also done by a Hantek digital oscilloscope with a sampling rate of 200 kHz. Based on the voltage range of the signals and the settings made on the dynamometer amplifier, the voltage received from the output signal is converted into a power unit with a factor of 10 newtons per volt.

4. Transfer function calculation

Due to the existence of an actuator and a weight installed on it in the test setup, the order of the dynamic system is considered two for all the weights. If an inappropriate output is reached, the order of the dynamic system must be increased, but otherwise, the lowest order that has a suitable estimation percentage is selected. The basic assumptions considered to calculate the simulation model include the invariance of the system with respect to time and its linearity. The method used for the identification process is the output-error model. Output error models are a special configuration of polynomial models. By using data in the frequency range and continuous-time

* Manuscript received: 05 January 2022, Revised, 07 June 2022, Accepted, 28 June 2022.

¹. MSc Student in Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² MSc Student in Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

³. Corresponding author, Professor in Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Email: imani@um.ac.ir

equations, it is possible to estimate the transformation function based on the output error model. In these calculations, the amount of delay of the input signal data compared to the output signal data is considered.

5. Identification test result

Using the identification tool available in MATLAB software, the results were obtained. The identification process is repeated for the weights of 146, 354 and 425 grams, and the coefficients of the transformation functions obtained for each one are changed according to the value of the loaded weight. In order to evaluate the accuracy of the estimation of the conversion function, first the experimental data of the input signal (time domain) are multiplied by the conversion function to obtain the modeled output. Then, the experimental data of the output signal in the time domain is compared with the modeled output. This comparison is based on the mean square of the normal error. The highest amount of similarity corresponds to the test of 354 grams, which is 80.58%, and the lowest is 80.20%, corresponding to the weight of 425 grams. Figure 2 shows the fitting diagram of the simulated output along with the experimental output signal for a weight of 354 grams.

6. Conclusion

The identification test was performed on the actuator in a state where different weights were attached to it. By implementation this test in the frequency range of 60 to 160 Hz, the noise frequency can be removed without damaging the information of the received signal. The highest rate of similarity between the experimental signal and the signal obtained from the simulation was 80.58% (at the time of connecting the weight of 354 grams) and the lowest rate of similarity was 80.2% (at the time of connecting the weight of 425 grams).

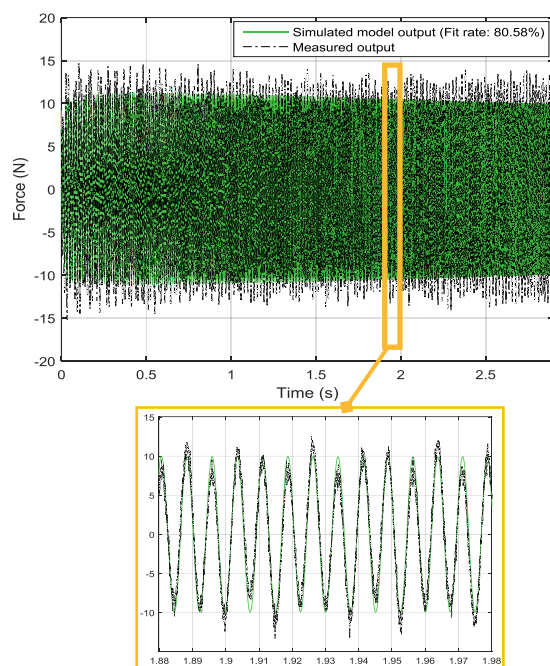


Fig.2. Simulated and real output signal for 354 gr

شناسایی پارامترهای موتور خطی الکترومغناطیسی به منظور تولید نیروی اینرسی با استفاده از میکروکنترلر ARM*

پژوهشی

مهران مظفری جوین^(۱) سید علیرضا داودی ناوخ^(۲) بهنام معتکف ایمانی^(۳)

چکیده یکی از زمینه‌های پژوهشی مهمی که امروزه ضرورت آن بیش از پیش در صنایع مختلف حس می‌شود، فرایند کنترل نیروی عملگرها به صورت بلادرنگ است که برای تحقق بخشیدن به این مهم و دستیابی به بهترین عملکرد عملگر نیاز است ابتدا پارامترهای مدل دینامیکی آن شناسایی شوند. در این پژوهش به منظور شناسایی پارامترهای عملگر الکترومغناطیسی، بستر آزمایشی طراحی و ساخته شده است که در این سیستم، فرایند تولید سیگنال مرجع برای شناسایی به صورت بلادرنگ توسط کارت STM32F746ZG انجام می‌پذیرد. میکروکنترلر ARM-Cortex M7 کارت مذکور امکان تولید هر نوع سیگنال با فرکانس، دامنه و میانگین مورد نظر را فراهم کرده است. در این بستر آزمایشگاهی برای شناسایی سیستم یک سیگنال هارمونیک فرکانس متغیر چیرپ تولید شده است تا رفتار عملگر را در بازه‌های فرکانسی مختلف بررسی نماید. مقدار نیروی اینرسی خروجی از عملگر توسط دینامومتر Kistler مدل 9255B اندازه‌گیری می‌گردد. در نهایت با تحلیل پاسخ سیستم، مدل دینامیکی مناسب برای بستر آزمایشی با موفقیت تخمین زده می‌شود.

واژه‌های کلیدی شناسایی سیستم، عملگر الکترومغناطیسی، کارت STM32، سیگنال چیرپ.

مقدمه

تفاوت که به جای نیروی مایع از گازهای فشرده برای تأمین فشار درون سیلندر استفاده می‌شود. دارا بودن عوامل غیرخطی و پارامترهای متغیر با زمان، استفاده از این عملگرها را با مشکل روبه‌رو می‌کند [3].

دسته دیگری از عملگرها که کاربرد آن‌ها رو به افزایش است، پیروالکتریک‌ها هستند. این عملگرها تبدیلی کارآمد از انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی را امکان‌پذیر می‌کنند. مهم‌ترین مزیت عملگرهای پیروالکتریک حساسیت بالا و دقت جابه‌جایی در حد نانومتر است اما در مقابل نقطه ضعف این عملگرها مربوط به پدیده هیسترزیس (Hysteresis) موجود در مواد پیروالکتریک است که کنترل انبساطی آن‌ها را به صورت تکرار شونده، دشوار می‌کند [4].

یکی از روش‌های تولید نیرو در عملگرها، استفاده از نیروی مغناطیسی حاصل از دو سیم‌پیچ ثابت و متحرک می‌باشد که طرز کار عملگرهای الکترومغناطیسی بر این اساس بنیان شده است. به همین سبب عملگرهای الکترومغناطیسی پاسخ زمانی سریع‌تری نسبت به دیگر عملگرها دارند و محدوده فرکانسی وسیع‌تری را پشتیبانی می‌کنند. از معروف‌ترین نوع این عملگرها می‌توان به

عملگر یا موتور خطی دستگاهی است که معمولاً فرمان را در قالب یک سیگنال الکتریکی دریافت می‌کند، سپس با تغییر ماهیت و تقویت توان آن، صورت‌های دیگری از انرژی را ایجاد خواهد کرد. اصطلاح عملگر خطی طیف وسیعی از محصولات را شامل می‌گردد. از زاویه‌ای دیگر عملگر خطی یک وسیله مکانیکی است که با استفاده از نیروی الکترومغناطیسی، هوا یا مایع حرکت در یک راستا را به وجود می‌آورد [1] که بر اساس نحوه تولید نیرو به دسته‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. از معروف‌ترین عملگرهای مورد استفاده در صنایع گوناگون می‌توان به انواع عملگرهای خطی هیدرولیکی اشاره نمود. این عملگرها نیروی خروجی لازم را از طریق فشار هیدرواستاتیکی وارد شده به پیستون متحرک درون سیلندر تأمین می‌کنند. وظیفه کنترل موقعیت سیلندر در عملگرهای هیدرولیکی برعهده شیر سروو هیدرولیک و یک پمپ می‌باشد [2]. این عملگرها اغلب در دستگاه‌هایی با نیروی مورد نیاز در حد چندین تن و فرکانس کاری کمتر از ۲۰ هرتز کاربرد دارند. ساختار عملگرهای خطی پنوماتیک، مشابه عملگرهای خطی هیدرولیکی می‌باشد با این

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۱۰/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۴/۷ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

VCM اشاره کرد که به آن موتور الکترومغناطیسی هم گفته می‌شود. این عملگرها به لحاظ ساختاری از دو بخش تشکیل شده‌اند، بخش بیرونی آن‌ها یک آهن‌ربای مغناطیس دائم است که یک میدان مغناطیسی ثابت تولید می‌کند و بخش داخلی یک سیم‌پیچ شعاعی متحرک می‌باشد که در این میدان مغناطیسی با یک فنر معلق شده است [5].

امروزه دامنه کاربرد عملگرهای الکترومغناطیسی بسیار گسترش یافته است به طوری که در تجهیزات با دقت بالا نظیر ضربان‌سازهای قلب تا صنایع هوافضا، جاذب‌های دینامیکی و در فرایندهایی که فرکانس کاری بالایی نیاز دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دسته از عملگرها توانایی تولید نیرو در بازه‌های فرکانسی بسیار متنوعی را دارند که مقدار این نیروی خروجی با اندازه سیم‌پیچ داخلی آن‌ها متناسب است. با توجه به ساختار عملگرهای الکترومغناطیسی، مصرف انرژی و هزینه تعمیر و نگهداری پایین‌تری نسبت به عملگرهای مشابه دارند. اما نکته حائز اهمیت که این نوع عملگرها را از سایرین متمایز می‌نماید، شتاب بسیار بالای خروجی آن‌ها است که سرعت پاسخ بالایی ایجاد کرده و سیگنال فرمان ورودی را به خوبی و دقیق پیروی می‌کند که این مهم در کنترل نیروی عملگر تأثیر به سزایی می‌گذارد. به منظور کنترل نیروی خروجی عملگر مغناطیسی نیاز است ابتدا رفتار عملگر تحت شرایط مختلف بررسی شود تا پارامترهای دینامیکی عملگر قابل شناسایی باشند. در فرایند شناسایی پارامترهای یک سیستم دینامیکی، اغلب یک سیگنال ورودی یا مرجع به سیستم اعمال می‌شود و سپس با تحلیل خروجی سیستم نسبت به آن ورودی مرجع پارامترهای مورد نیاز تخمین زده می‌شوند. سیگنال ورودی وابسته به نوع سیستم متفاوت می‌باشد، از معروف‌ترین سیگنال‌ها برای شناسایی سیستم می‌توان به سیگنال پله، نویز سفید و چیرپ اشاره نمود که در این پژوهش از سیگنال فرکانس متغیر چیرپ استفاده شده است تا رفتار عملگر در بازه‌های فرکانسی متفاوت مورد ارزیابی قرار بگیرد. برای تولید سیگنال شناسایی پارامترهای دینامیکی عملگر، از کارت STM32F746ZG به عنوان مرجع تولیدکننده سیگنال بهره گرفته شده است که بدین منظور مبدل دیجیتال به آنالوگ کارت مذکور توانایی بالایی در ایجاد سیگنال‌های مختلف به آن می‌بخشد. در فرایند تولید سیگنال توسط کارت برای افزایش نرخ داده‌گذاری مبدل دیجیتال به آنالوگ، واحد دسترسی مستقیم به

حافظه مربوط به کارت راه‌اندازی شده است که باعث می‌شود داده‌های به صورت بلادرنگ از حافظه به مبدل دیجیتال به آنالوگ انتقال پیدا کنند. هنگامی که بخش دسترسی مستقیم به حافظه فعال باشد، واحد پردازش مرکزی کارت مورد استفاده قرار نمی‌گیرد که به موجب آن از اتلاف قدرت پردازشی کارت برای کارهای سبک‌تر جلوگیری می‌شود. در این پژوهش با برنامه‌نویسی‌های انجام شده به منظور فعال‌سازی و هماهنگ کردن بخش‌های مختلف کارت STM32 امکان تولید هر نوع سیگنال با شکل موج و فرکانس مورد نیاز فراهم شده است که این قابلیت در شناسایی و کنترل سیستم‌های دینامیکی همانند عملگرها بسیار ارزشمند و مفید واقع می‌شود.

مطالعه و بررسی پژوهش‌های پیشین صورت گرفته در زمینه عملگرها و روش‌های شناسایی مربوط به آن‌ها حاکی از متنوع بودن آزمایش‌ها برای دستیابی به کنترل دقیق‌تر نیروی خروجی عملگر بوده است اما در اکثر آن‌ها به مسئله شناسایی پارامترهای دینامیکی عملگر و نحوه تولید سیگنال مرجع مطلوب با کارت‌های کنترلی به طور خاص پرداخته نشده است.

به عنوان مثال در پژوهشی با استفاده از دو عملگر خطی VCM، به کاهش ارتعاشات تولیدی موتور در خودروهای سواری پرداخته شده است. به کارگیری این عملگرها به دلیل داشتن گستره وسیع فرکانسی و پاسخ سریع در از بین بردن ارتعاشات مضر کاربرد فراوانی دارد. فرکانس نمونه‌برداری در آزمایش‌های مربوط به این پروژه حدود ۱۰ کیلوهرتز است. در این تحقیق ابتدا با اتصال VCM به یک نیروسنج و شتاب‌سنج میزان نیروی تولیدی عملگر و مقدار فرکانس طبیعی آن اندازه‌گیری می‌شود. در این بستر دامنه نیروی کاری ثابت و به میزان ۶۰ نیوتون است که به وسیله یک سیگنال سینوسی و از نوع مدولاسیون عرض پالس (PWM) تولید شده است. بالا بردن فرکانس داده‌برداری به سریع‌تر شدن فرایند کنترل کمک شایانی می‌کند. عدم کنترل دامنه نیروی عملگر، باعث کاهش توانایی و مزایای سیستم کنترلی می‌شود. با این وجود محرک‌های نصب شده در اسکلت زیرین خودرو می‌توانند ارتعاشات حاصل از کار موتور در دور ۱۵۰۰ دور بر دقیقه را ۲۵ الی ۴۰ درصد کاهش دهند [6].

McMahan و همکاران، با استفاده از شکل موج نوسانی بر روی یک محرک خطی سیم پیچ (که به آن محرک رزونانس خطی نیز گفته می‌شود)، به ایجاد ارتعاش همراه با فرکانس بالا در این

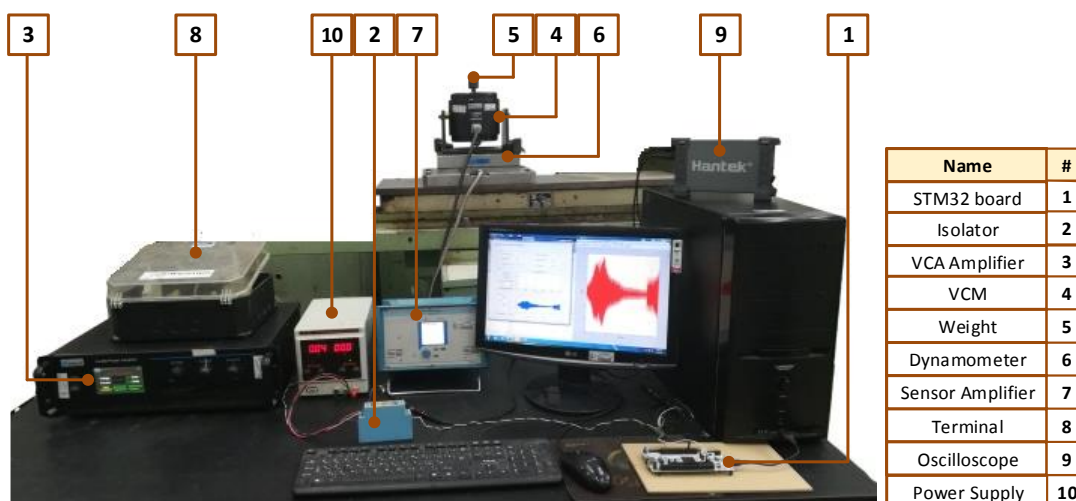
نمونه‌ای دیگر از کاربردهای صنعتی عملگرهای الکترومغناطیسی، کنترل ارتعاشات لرزش در فرآیند داخل تراشی بوده است. در تحقیق مذکور با بهره‌گیری از یک عملگر VCM که دارای رفتار دینامیکی خطی بوده است، کنترلری به منظور کنترل فعال نیروی خروجی عملگر طراحی شده است تا به کمک آن پایداری ابزار برشی در حین ماشین کاری افزایش یابد که در نهایت منجر به بهبود کیفیت سطح قطعه و میرایی ارتعاشات لرزش می‌گردد. برای دستیابی به مدل دینامیکی کارآمد در ابزار داخل تراش میراشده مجهز به عملگر الکترومغناطیس، یک آزمون شناسایی صورت گرفته است که در این آزمایش سیگنال دوره‌ای جاروب سینوسی در بازه فرکانسی ۵۰ تا ۱۲۵۰ هرتز برای تحریک بستر آزمایشی مورد استفاده قرار گرفته است [9].

بستر آزمون

همانند شکل (۱) در بستر آزمایش طراحی شده به منظور شناسایی پارامترهای دینامیکی عملگر، از یک دینامومتر ساخت شرکت سوئسی KISTLER برای اندازه‌گیری نیروهای دینامیکی بهره گرفته شده است که توانایی سنجش نیرو در سه محور را دارا است. صلب بودن دینامومتر منجر به بزرگ بودن فرکانس طبیعی آن می‌شود. به دلیل پایین بودن سطح ولتاژ خروجی دینامومتر نیاز است تا از یک تقویت‌کننده سیگنال مربوط به حسگر مذکور استفاده شود. عملگر مورد آزمایش در این پژوهش، از نوع الکترومغناطیسی با ظرفیت نیرویی ۱۰۰ نیوتن و پهنای باند فرکانسی ۴ کیلوهرتز بوده است. کارت STM32 در این بستر تحقیقاتی نقش تولیدکننده سیگنال مورد نیاز برای شناسایی را ایفا می‌کند. برنامه‌نویسی انجام شده بر روی کارت مذکور، قابلیت تولید سیگنال‌هایی نظیر سینوسی، مثلثی، مربعی و سیگنال چیرپ را به کمک مبدل دیجیتال به آنالوگ کارت فراهم می‌کند.

دستگاه می‌پردازند. این پژوهش به دنبال بهینه‌سازی، تجزیه و تحلیل در عملکرد این دسته از دستگاه‌های محرک است. پاسخ دینامیکی این محرک‌ها بستگی زیادی به مواد مورد استفاده در تعلیق آن‌ها دارد. غیر خطی بودن سیستم تعلیق نسبت به دامنه سیگنال ورودی موجب ایجاد تغییرات ناخواسته در فرکانس تشدید خواهد شد که این رفتار پیش‌بینی سیگنال پاسخ را دشوار می‌کند. به همین دلیل باید به جای لاستیک‌های سیلیکونی از نئوپرین‌ها (Neoprene) یا فنرهای مارپیچ استفاده کرد. زیرا سفتی خارج از محور بالا در آن‌ها باعث ایجاد رفتاری خطی‌تر در تعلیق محرک می‌شود. نویسندگان برای جبران اعوجاج باقی‌مانده نیز از الگوریتم‌های کنترلی بهره می‌برند. برای تولید سیگنال فرمان عملگر در بستر آزمایشی از کارت جمع‌آوری داده‌های (DAQ) چندمنظوره با نرخ نمونه‌برداری ۱۰ کیلوهرتز به کار گرفته شده است. هم‌چنین این کارت دریافت داده را از یک حسگر شتاب‌سنج انجام می‌دهد؛ در حالی که برخی از پارامترهای دستگاه توسط سازنده ارائه می‌شوند یا می‌توان مستقیم آن‌ها را اندازه‌گیری کرد، بقیه پارامترها باید به صورت تجربی مشخص شوند. در این پژوهش از تکنیک‌های جعبه ابزار شناسایی سیستم نرم‌افزار متلب استفاده شده است. جهت انجام آزمایش شناسایی، عملگر با فرمان سیگنال دوره‌ای جاروب سینوسی تحریک می‌شود که یکی از بهترین نوع سیگنال‌ها تحریک در آزمون‌های شناسایی به شمار می‌آید. سیگنال سینوسی مذکور به گونه‌ای برنامه‌ریزی شده که در طول ۳ ثانیه از ۱۰ تا ۱۰۰۰ هرتز را به صورت لگاریتمی جاروب خواهد کرد [7].

در مطالعه‌ای به دنبال عملکرد مطلوب به منظور از بین بردن ارتعاشات زیان‌آور در سازه‌های عمرانی، از عملگرهای الکترومغناطیسی و میراگرهای الکترومغناطیسی (EMD) برای ایجاد میرایی در سازه استفاده شده است. در این مطالعه با هدف کاهش ارتعاشات ناخواسته در سازه‌ها از کنترل عملگر خطی سیم‌پیچ به عنوان یک میراگر الکترومغناطیسی بهره گرفته شده است. در انتها برای انجام آزمون شناسایی، یک سیگنال دوره‌ای جاروب سینوسی به بستر آزمایشی اعمال می‌شود که به دلیل وجود برخی رفتارهای غیر خطی، خروجی‌های شبیه‌سازی شده مناسب نبودند. تولید نیروی کم توسط این نوع از عملگرها، موجب ضعیف بودن کارایی آن‌ها در کاربردهای این چینی می‌شود [8].



شکل ۱ بستر آزمایشی مورد استفاده برای شناسایی عملگر

ریاضی سیگنال‌های استاندارد (اشکال کسینوس، مثلثی و موج مربعی) در ادامه توضیح داده می‌شود. هم‌چنین پارامترهای تعیین‌کننده آن‌ها نیز در جدول (۱) مورد بررسی قرار داده شده‌است. شکل موج چیرپ کسینوسی و برخی از پارامترهای آن براساس روابط (۱) الی (۳) و برخی از پارامترهای موجود در آن قابل تعریف است [10].

جدول ۱ مشخصه‌های سیگنال چیرپ [10]

مشخصه	پارامتر	واحد
دامنه	A	ولت
میانگین	A_0	ولت
فاز اولیه	φ_0	رادیان
فرکانس اولیه	F_s	هرتز
فرکانس نهایی	F_f	هرتز
دوره چیرپ	T_c	ثانیه
متغیر زمانی	t	ثانیه
نرخ جاروب	α	هرتز بر ثانیه

$$S_{hc}(t) = A \cos(2\pi f(t)t + \varphi_0) + A_0 \quad (1)$$

$$f(t) = F_s + \frac{\alpha}{2} t \quad (2)$$

$$\alpha = (F_f - F_s)/T_c \quad (3)$$

سیگنال چیرپ مربعی هم به‌طور مشابه از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد که در آن sgn تابع علامت استاندارد است.

هدف از انجام آزمون شناسایی در این پژوهش، شناسایی مدل دینامیکی عملگر VCM به همراه وزنه متصل به آن است. این آزمون با گذاشتن وزنه‌های مختلف بر روی عملگر تکرار شده‌است تا برای هر وزنه یک تابع تبدیل مناسب حاصل شود. این وزنه‌ها در مقادیر ۱۴۶، ۳۵۴، ۴۲۵ گرم انتخاب شده و همانند شکل (۲) به عملگر متصل گردیده‌است. به‌منظور تحریک عملگر الکترومغناطیسی سیگنال چیرپ با طیف فرکانسی ۶۰ تا ۱۶۰ هرتز مورد استفاده قرار گرفت. فرض‌های ابتدایی در نظر گرفته شده برای محاسبه مدل شبیه‌سازی شامل نامتغیر بودن سیستم نسبت به زمان و خطی بودن آن می‌شود.



شکل ۲ نصب وزنه‌ها بر روی عملگر و اتصال آن به دینامومتر

آزمون شناسایی

در فرایند تولید سیگنال مرجع به‌منظور شناسایی سیستم، معادلات

در شکل‌های (۴) تا (۷) نشان داده شده است. سیگنال‌های تحریک در مدت زمان ۳ ثانیه، بازه ۶۰ تا ۱۶۰ هرتز را با گام فرکانسی ۱ هرتز جاروب می‌کنند. به منظور تولید سیگنال شناسایی کننده از مبدل دیجیتال به آنالوگ کارت STM32 در کنار واحد دسترسی مستقیم به حافظه (DMA) استفاده شده است و فرایند داده برداری نیز توسط اسیلوسکوپ دیجیتال Hantek با نرخ نمونه برداری ۲۰۰ کیلوهرتز صورت پذیرفت. در تمامی این شکل‌ها رفتار سیگنال خروجی تا اندازه‌ای یکسان است. میانگین سیگنال خروجی برای هر وزنه نزدیک به صفر مشاهده می‌شود. براساس دامنه ولتاژی سیگنال‌ها و تنظیمات انجام شده بر روی تقویت کننده دینامومتر، ولتاژ دریافت شده از سیگنال خروجی با ضریب ۱۰ نیوتون بر ولت به واحد نیرو تبدیل می‌شود. تغییرات نیرویی نشان داده شده در شکل‌های (۵) تا (۷) بیانگر بازه نیروی تولیدی توسط عملگر است. برای تمامی وزنه‌ها، گستره این بازه در بیشترین حالت خود به مقدار ۳۵ نیوتون می‌رسد.

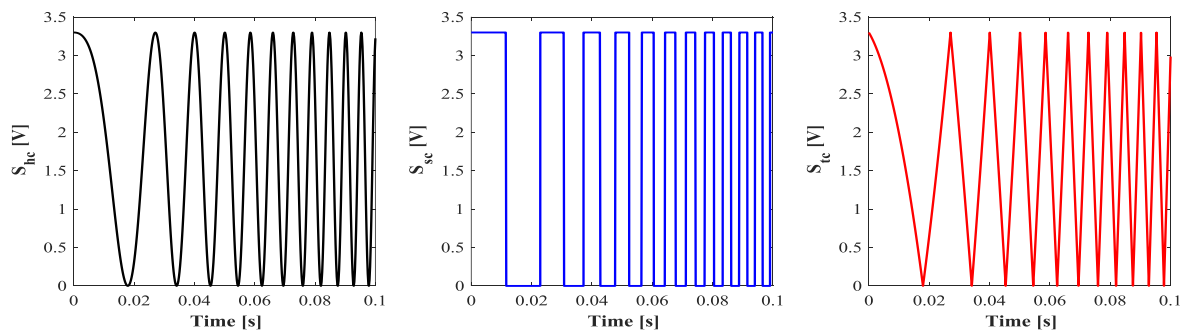
$$S_{sc}(t) = A \operatorname{sgn}(\cos(2\pi f(t)t + \varphi_0)) + A_0 \quad (4)$$

بر همین اساس سیگنال چیرپ مثلثی را می‌توان به صورت رابطه (۵) بیان کرد.

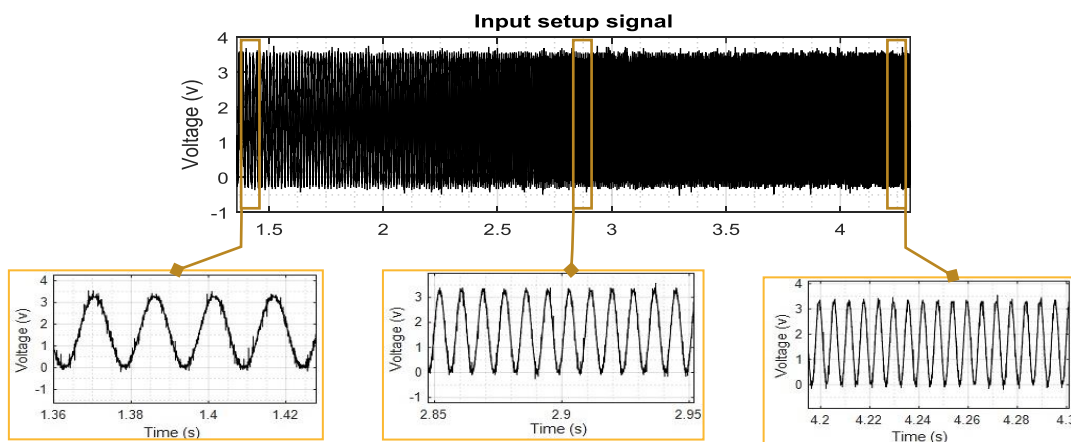
$$S_{tc}(t) = -\frac{2A}{\pi} \cos^{-1}(\cos(2\pi f(t)t + \varphi_0)) + (A + A_0) \quad (5)$$

عبارت فرکانس متغیر خطی $f(t)$ برای تمامی سیگنال‌ها توسط برنامه محاسبه می‌شود. تصویر معیار سیگنال‌های چیرپ در شکل (۳) نشان داده شده است. از آنجایی که مبدل دیجیتال به آنالوگ نمی‌تواند مقادیر منفی را بپذیرد و ولتاژ خروجی کارت STM حداکثر ۳/۳ ولت است، این سیگنال‌ها با حداکثر دامنه ۱/۶۵ ولت و مقدار متوسط ۱/۶۵ ولت ترسیم می‌شوند. واضح است که فرکانس‌های سیگنال به صورت خطی با زمان تغییر می‌کند.

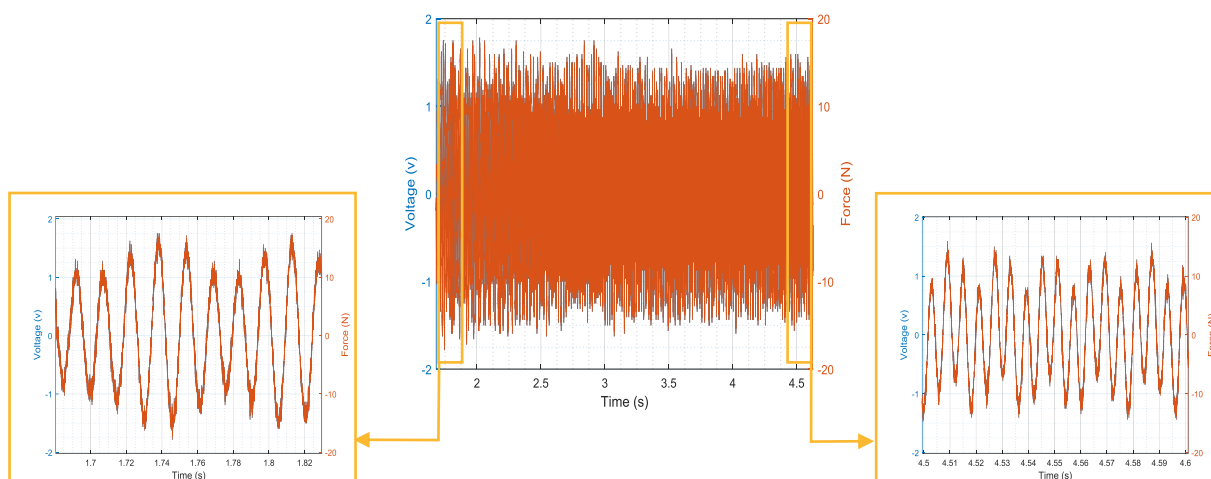
سیگنال تحریک اعمالی برای هر وزنه و پاسخ سیستم به آن



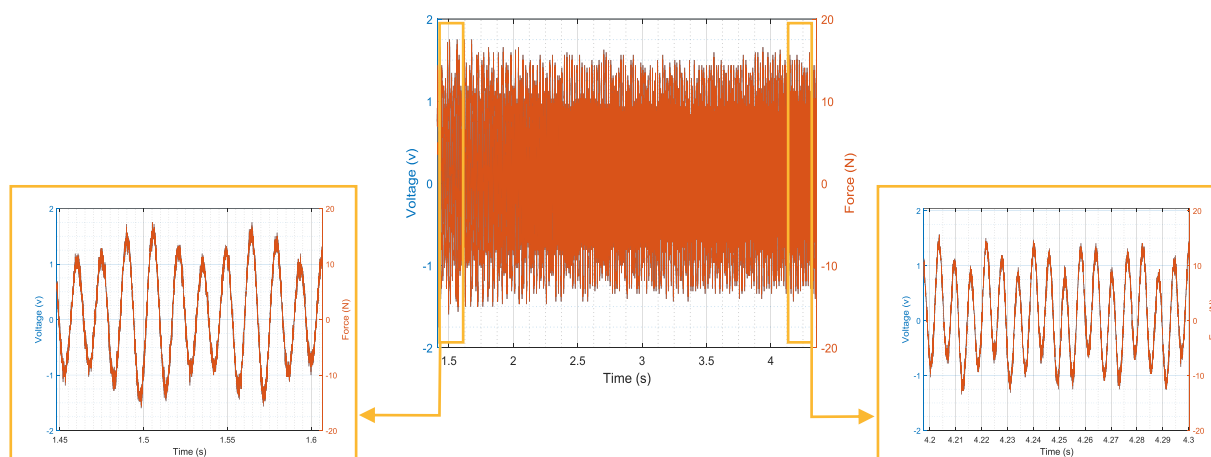
شکل ۳ شکل موج‌های مختلف با فرکانس‌های خطی متغیر



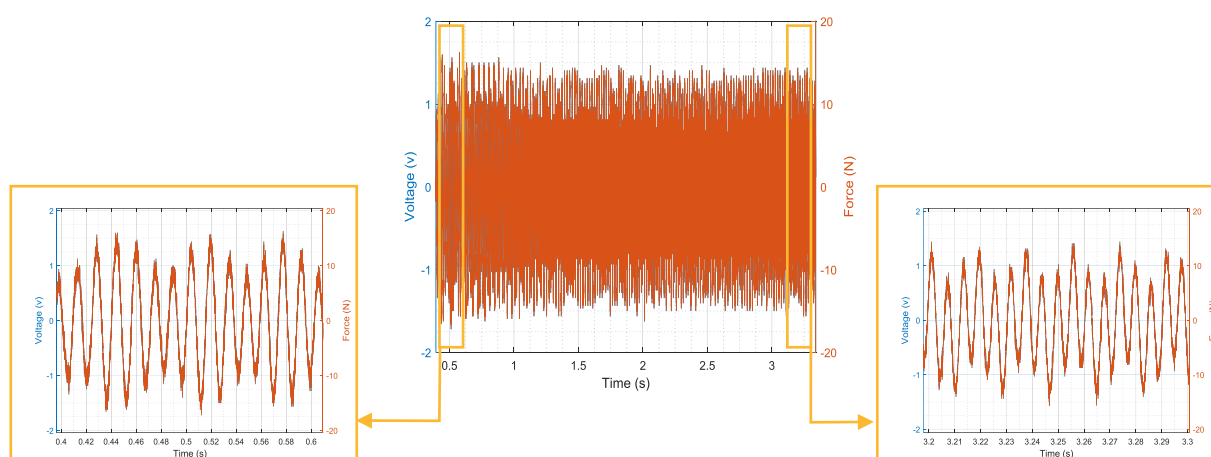
شکل ۴ سیگنال تحریک ورودی برای تمامی وزنه‌ها



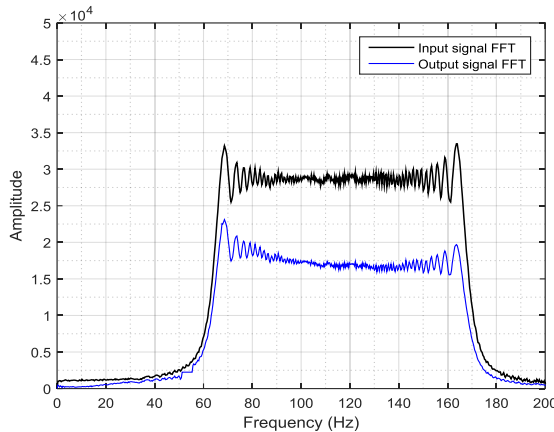
شکل ۵ دامنه نیرو و ولتاژ سیگنال خروجی برای وزنه ۱۴۶ گرمی



شکل ۶ دامنه نیرو و ولتاژ سیگنال خروجی برای وزنه ۳۵۴ گرمی



شکل ۷ دامنه نیرو و ولتاژ سیگنال خروجی برای وزنه ۴۲۵ گرمی



شکل ۱۰ طیف فرکانسی سیگنال‌های ورودی و خروجی در زمان اتصال وزنه ۴۲۵ گرمی

محاسبه تابع تبدیل

به دلیل وجود یک عملگر و وزنه نصب شده بر روی آن در بستر آزمایشی، مرتبه سیستم دینامیکی برای تمامی وزنه‌ها دو در نظر گرفته می‌شود. در صورت رسیدن به خروجی نامناسب باید مرتبه سیستم دینامیکی افزایش پیدا کند ولی در غیر این صورت کمترین مرتبه‌ای که درصد تخمین مناسبی داشته باشد انتخاب می‌گردد. روشی که برای فرایند شناسایی از آن استفاده می‌شود، مدل خطای خروجی (Output-error model) است. مدل‌های خطای خروجی پیکربندی خاصی از مدل‌های چندجمله‌ای هستند که ساختار کلی آن‌ها در روابط (۶) الی (۸) ارائه شده‌است.

$$y(t) = \frac{B(s)}{F(s)}u(t) + e(t) \quad (6)$$

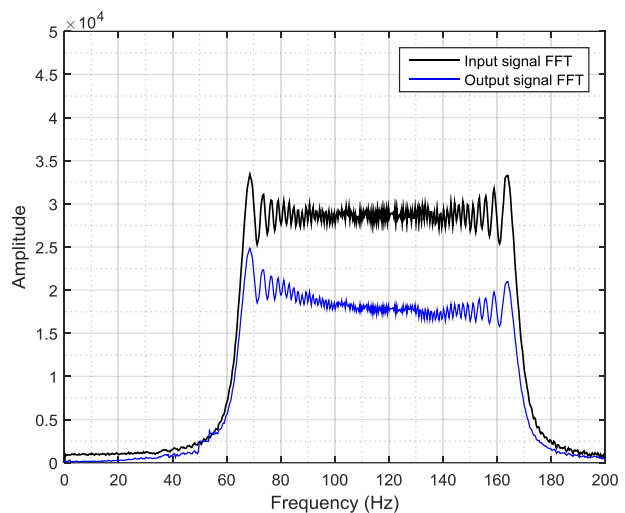
$$nb: B(s) = b_{nb}s^{(nb-1)} + b_{nb-1}s^{(nb-2)} + \dots + b_1 \quad (7)$$

$$nf: F(s) = s^{nf} + f_{nf}s^{(nf-1)} + \dots + f_1 \quad (8)$$

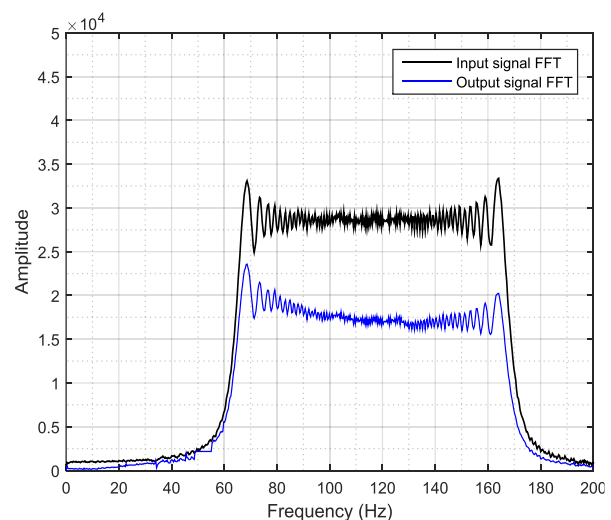
با به کارگیری داده‌ها در بازه فرکانسی و معادلات زمان پیوسته، تخمین خطای خروجی براساس یک تابع تبدیل همانند رابطه (۹) خواهد شد. مقادیر nb و nf به ترتیب بیانگر مرتبه صورت و مخرج تابع تبدیل هستند. هم‌چنین $e(t)$ خطای حاصل از اختلاف خروجی مدل شبیه‌سازی با خروجی تجربی است. در این محاسبات از میزان تأخیر داده‌های سیگنال ورودی نسبت به داده‌های سیگنال خروجی صرف‌نظر می‌شود.

$$G(s) = \frac{B(s)}{F(s)} = \frac{b_{nb}s^{(nb-1)} + b_{nb-1}s^{(nb-2)} + \dots + b_1}{s^{nf} + f_{nf}s^{(nf-1)} + \dots + f_1} \quad (9)$$

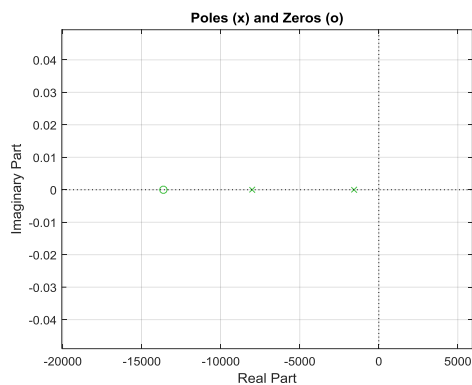
سیگنال‌های ورودی و خروجی ذخیره‌سازی شده به حوزه فرکانس انتقال می‌یابند تا رفتار فرکانسی آن‌ها بهتر مورد بررسی قرار گیرند. شکل‌های (۸) الی (۱۰) از تبدیل فوریه سریع (FFT) داده‌های حوزه زمان به دست آمده‌اند. سرعت تغییر فرکانس سیگنال خروجی نسبت به زمان در فرکانس‌های ابتدایی کمی بیشتر است و در ادامه کمتر می‌شود. این رفتار در سیگنال خروجی تمامی وزنه‌ها موجود است. در هیچ کدام از این شکل‌ها وجود فرکانس طبیعی در بازه فرکانسی سیگنال تحریک قابل مشاهده نمی‌باشد.



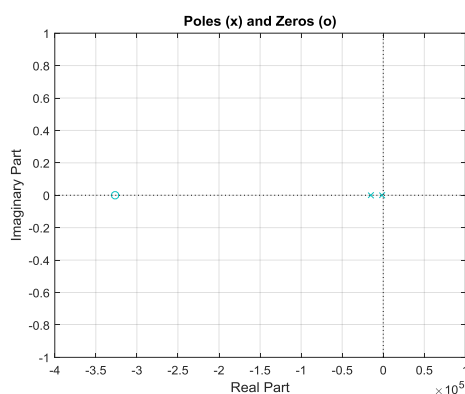
شکل ۸ طیف فرکانسی سیگنال‌های ورودی و خروجی در زمان اتصال وزنه ۱۴۶ گرمی



شکل ۹ طیف فرکانسی سیگنال‌های ورودی و خروجی در زمان اتصال وزنه ۳۵۴ گرمی



شکل ۱۲ نمایش صفر و قطب‌ها بر اساس تابع تبدیل به دست آمده برای وزنه ۳۵۴ گرمی



شکل ۱۳ نمایش صفر و قطب‌ها بر اساس تابع تبدیل به دست آمده برای وزنه ۴۲۵ گرمی

به منظور ارزیابی میزان دقت تخمین تابع تبدیل، ابتدا داده‌های تجربی سیگنال ورودی (حوزه زمان) در تابع تبدیل ضرب می‌شوند تا خروجی مدل‌سازی شده حاصل گردد. سپس باید داده‌های تجربی سیگنال خروجی در حوزه زمان را با خروجی مدل‌سازی شده مقایسه کرد. در رابطه (۱۳) این مقایسه بر اساس معیار میانگین مربعات خطای نرمال ارائه شده است. برازش ۱۰۰ درصدی بدین معنی است که خروجی مدل با خروجی اندازه‌گیری شده مطابقت دارد. در این رابطه $h(s)$ به عنوان منحنی پاسخ فرکانس تجربی تعریف می‌شود [11].

$$\eta_s = 100 \left(1 - \frac{\|h(s) - G(s)\|_2}{\|h(s) - \text{mean}(h(s))\|_2} \right) \quad (13)$$

نمودارهای برازش خروجی شبیه‌سازی شده با خروجی تجربی نیز به ترتیب در شکل‌های (۱۴) الی (۱۶) به نمایش درآمده است. بیشترین میزان تشابه مربوط به آزمایش وزنه ۳۵۴

نتایج آزمون شناسایی

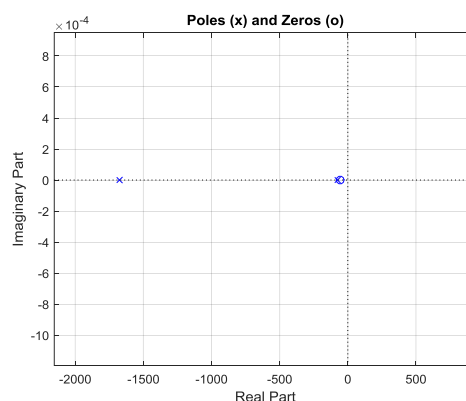
با استفاده از ابزار شناسایی موجود در نرم‌افزار متلب نتایج بیان شده در این بخش به دست آمده است. داده‌های سیگنال ورودی از جنس ولتاژ و در واحد ولت و سیگنال خروجی نیز از جنس نیرو و در واحد نیوتن است. فرایند شناسایی برای وزنه‌های ۱۴۶، ۳۵۴ و ۴۲۵ گرمی تکرار می‌شود. توابع تبدیل به دست آمده برای هر یک از این وزنه‌ها به ترتیب در رابطه‌های (۱۰) الی (۱۲) بیان شده‌اند. مقادیر ضرایب هر یک از توابع تبدیل متناسب با مقدار وزنه بارگذاری شده تغییر می‌یابد.

$$G_{146gr}(s) = \frac{-1.181e04 \times s - 6.604e05}{s^2 + 1751 \times s + 1.266e05} \quad (10)$$

$$G_{354gr}(s) = \frac{-6375 \times s - 8.689e07}{s^2 + 9591 \times s + 1.26e07} \quad (11)$$

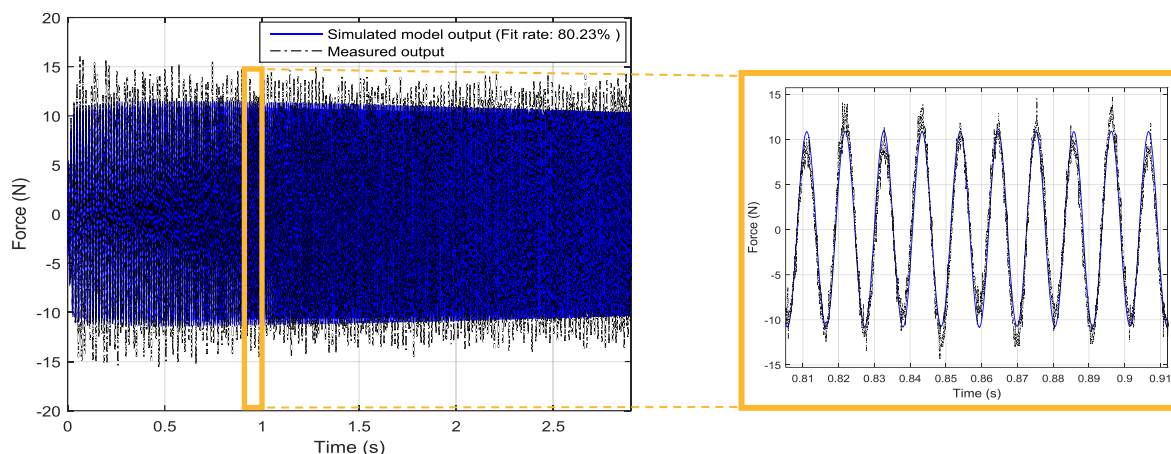
$$G_{425gr}(s) = \frac{-475.4 \times s - 1.552e08}{s^2 + 1.668e04 \times s + 2.284e07} \quad (12)$$

در ادامه مکان صفر و قطب‌های توابع تبدیل تمامی وزنه‌ها در شکل‌های (۱۱) الی (۱۳) آورده شده است. تمامی قطب‌ها در سمت چپ محور حقیقی قرار دارند که نشان‌دهنده پایداری سیستم مدل‌سازی شده برای تمامی وزنه‌ها است. با افزایش وزن بارگذاری، قطب‌ها از محور موهومی دورتر می‌شوند که حاکی از افزایش سرعت پاسخ گذرای سیستم است. نداشتن مقدار موهومی، منفی بودن مقدار حقیقی و کمتر از یک بودن اندازه هر یک از قطب‌ها دلیلی بر پاسخ میرایی شدید در سیستم دینامیکی خواهد بود.

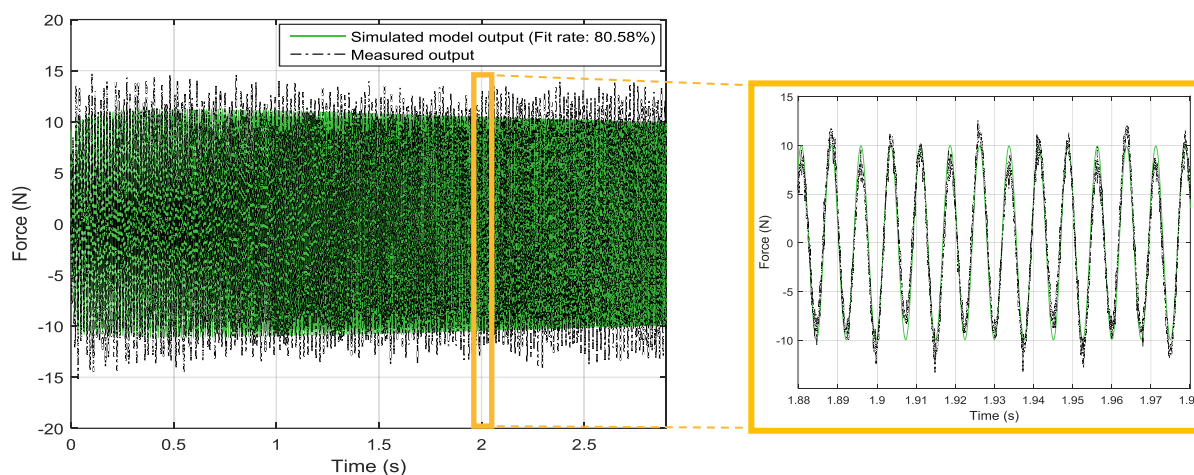


شکل ۱۱ نمایش صفر و قطب‌ها بر اساس تابع تبدیل به دست آمده برای وزنه ۱۴۶ گرمی

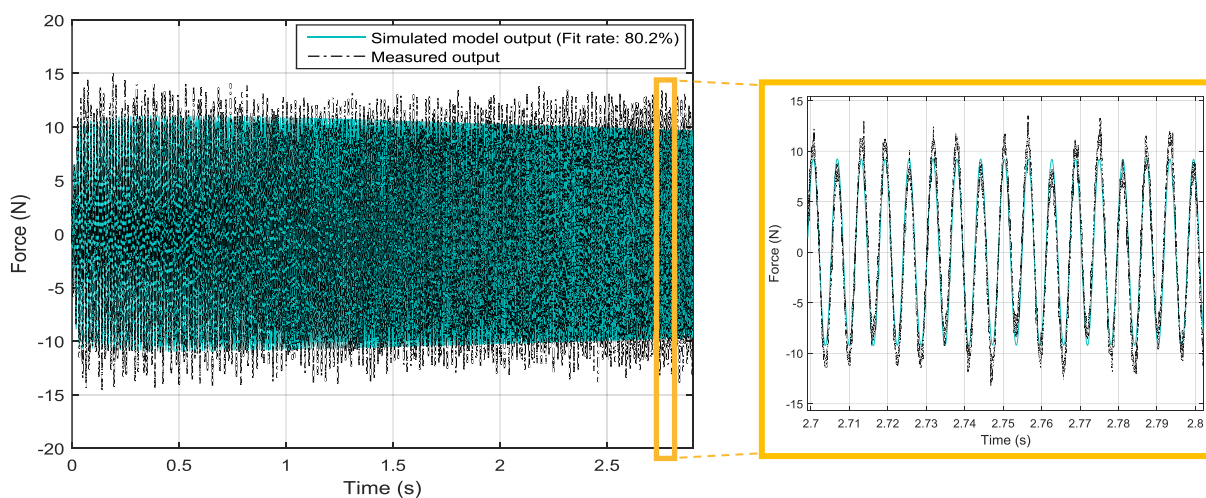
گرمی که برابر ۸۰/۵۸ درصد و کمترین آن مقدار ۸۰/۲۰ درصد و مربوط به وزنه ۴۲۵ گرمی می‌شود.



شکل ۱۴ سیگنال شبیه‌سازی شده و سیگنال خروجی واقعی برای وزنه ۱۴۶ گرم



شکل ۱۵ سیگنال شبیه‌سازی شده و سیگنال خروجی واقعی برای وزنه ۳۵۴ گرم



شکل ۱۶ سیگنال شبیه‌سازی شده و سیگنال خروجی واقعی برای وزنه ۴۲۵ گرم

Chirp	چیرپ	جمع بندی
Identification	شناسایی	در این بخش آزمون شناسایی بر روی عملگر در حالتی که وزنه های مختلفی به آن متصل بود، صورت پذیرفت. با انجام این آزمون در طیف فرکانسی ۶۰ تا ۱۶۰ هرتز می توان فرکانس نویز را بدون آسیب دیدن اطلاعات سیگنال دریافتی حذف کرد. بیشترین نرخ تشابه بین سیگنال تجربی و سیگنال حاصل از شبیه سازی به مقدار ۸۰/۵۸ درصد (در زمان اتصال وزنه ۳۵۴ گرمی) و کمترین نرخ تشابه ۸۰/۲ درصد (در زمان اتصال وزنه ۴۲۵ گرمی) به دست آمد.
S_{hc}	سیگنال چیرپ هارمونیک	
S_{sc}	سیگنال چیرپ مربعی	
S_{tc}	سیگنال چیرپ مثلثی	
Nb	مرتبۀ صورت	
Nf	مرتبۀ مخرج	
e(t)	خطا	
G(s)	تابع تبدیل	
η_s	نرخ برازش	

واژه نامه

Actuator

عملگر

مراجع

1. Alegria, F., "Sensors and Actuators ", IST Press, (2021).
2. Ghoreshi, H., Moetakef Imani, B., Ghandaharion, A.M., "Design and implementation of digital control unit of fatigue test machine", *ICME10*, Babol, Iran, (2010), (In Persian).
3. Chavoshian, S.M., Taghizadeh, M., "Adaptive control for position control of a pneumatic actuator under variable loads", *Modares Mechanical Engineering*, Vol.16, No.6, Pp.181-188, (2016), (In Persian).
4. Rupitsch, S.J., "Piezoelectric Sensors and Actuators", Springer Verlag, (2019).
5. Safehian J, Akbari A A, Hosseini Sani S K. "The Novel Control Method for Voice Coil Actuator Fatigue Testing Machine". *Modares Mechanical Engineering*. Vol.17, No.7, Pp.79-90, (2017), (In Persian).
6. Kim, S.H., Park, U.H., Kim, J.H., "Voice Coil Actuated (VCA) Engine Mount for Vibration Reduction in Automobile", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 21, No. 3, Pp. 771-777, (2020).
7. McMahan, W., Kuchenbecker, K.J. "Dynamic Modeling and Control of Voice-Coil Actuators for High-Fidelity Display of Haptic Vibrations", *IEEE Haptics Symposium*, Houston, TX, USA. ,(2014).
8. Ao, W.K., Reynolds, P., "Evaluation of Optimal Analysis, Design, and Testing of Electromagnetic Shunt Damper for Vibration Control of a Civil Structure", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 27, No.3, (2019).
9. Fallah, M., Moetakef Imani, B., "Dynamic model identification of an active damped boring bar", *Modares Mechanical Engineering*, Vol.19, No.8, Pp.1917-1928, (2019), (In Persian).
10. Fallah, M., Mozaffari, M., Davodi, A., "STM32 DAC TUTORIAL: with application to system identification", (2021).
11. Ljung L., "Experiments with Identification of Continuous Time Models", Linköpings university, *15th IFAC Symposium on System Identification*, Saint-Malo, France, (2009).

CONTENTS

The Effect of Material Degradation on the Bending of Laminated Plates	Meisam Mohahmmadi - Mojtaba Mahmoodi	1
Calculating the Added Mass Matrix of an Airship Using Boundary Element Method	Ali Jafarian - Mohammadreza Alavi Tabatabaei Saeed Shakhesi	15
Applying Suction and Blowing Flow Control Approaches for Reducing the Flow-Induced Instabilities of Elastically-Mounted Square Cylinder	Amir Hossein Rabiee - Mohammad Reza Barzan Abolfazl Mohammadebrahim	29
Flow Prediction in Two-Dimensional Asymmetric Diffuser by Neural Network and Comparison with Three Turbulence Models and Experimental Data	Mostafa Zamani Mohiabadi – Farid Soltani Ahmad Reza Boroomandpour Ghanbar Ali Sheikhzadeh	45
Numerical Analysis of the Hydrodynamic Behavior of Three-Phase Mixing of Rice Husk, Sand, and Air in a Bubbling Fluidized Bed with Particle Granular Behavior	Reza Karimi Ahmadi - Hamid Reza Nazif	61
Identifying the Electromagnetic Linear Motor Parameters for Producing Inertial Force Using ARM Microcontroller	Mehran Mozaffari-Jovein Seyyed Alireza Davodi-Navokh Behnam Moetakef-Imani	87



JOURNAL OF APPLIED AND COMPUTATIONAL SCIENCES IN MECHANICS

Ferdowsi University of Mashhad

ISSN: 2008-918X

Editor- in-Chief: Dr. Mehran Kadkhodayan

General Director: Dr. Hamid Niazmand

Concessionaire: Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Dr. Akbar Afaghi Khatibi	Associate Professor	RMIT University, Australia
Dr. Kazem Abhary	Associate Professor	University of South Australia, Australia
Dr. Aliakbar Akbarzadeh	Professor	RMIT University, Australia
Dr. Hamed Haddad Khodaparast	Associate Professor	Swansea University, UK
Dr. Masoud Boroomand	Professor	Amirkabir University of Technology
Dr. S.Mohammad Reza Khalili	Professor	K.N. Toosi University of Technology
Dr. Ehsan Roohi	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Mahmoud Shariati	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Ebrahim Shirani	Professor	Isfahan University of Technology
Dr. Masoud Tahani	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Mohammad Reza Kazempour Mofrad	Professor	University of California, United States
Dr. Mehran Kadkhodayan	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Hamid Moeenfar	Associate Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Behdad Moghtaderi	Professor	University of Newcastle, Australia
Dr. Mohammad Reza Mahpeykar	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Simin Nasser	Professor	Kennesaw, United States
Dr. Hamid Niazmand	Professor	Ferdowsi University of Mashhad

Text Editor: Dr. Y. Bina

Executive Director: T. Hooshmand

Typesetting: A. Noie

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics
Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad
P. O. Box: 91775-1111, Mashhad, I.R. IRAN

Tel: +98 51 38806024

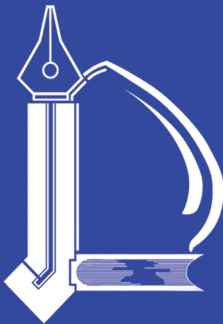
Fax: +98 51 38763301

Email: ejour@um.ac.ir

Web site: <http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir>

Indexed in: ISC, SID, Magiran, EBSCO

ISSN 2008 - 918X



Ferdowsi University
of Mashhad

Journal of
Applied and
Computational Sciences
in Mechanics

Serial No. 28

- | | |
|--|-----------|
| The Effect of Material Degradation on the Bending of Laminated Plates | 1 |
| Meisam Mohahmmadi - Mojtaba Mahmoodi | |
| Calculating the Added Mass Matrix of an Airship Using Boundary Element Method | 15 |
| Ali Jafarian - Mohammadreza Alavi Tabatabaei
Saeed Shakhesi | |
| Applying Suction and Blowing Flow Control Approaches for Reducing the Flow-Induced Instabilities of Elastically-Mounted Square Cylinder | 29 |
| Amir Hossein Rabiee - Mohammad Reza Barzan
Abolfazl Mohammadebrahim | |
| Flow Prediction in Two-Dimensional Asymmetric Diffuser by Neural Network and Comparison with Three Turbulence Models and Experimental Data | 45 |
| Mostafa Zamani Mohiabadi - Farid Soltani
Ahmad Reza Boroomandpour
Ghanbar Ali Sheikhzadeh | |
| Numerical Analysis of the Hydrodynamic Behavior of Three-Phase Mixing of Rice Husk, Sand, and Air in a Bubbling Fluidized Bed with Particle Granular Behavior | 61 |
| Reza Karimi Ahmadi - Hamid Reza Nazif | |
| Identifying the Electromagnetic Linear Motor Parameters for Producing Inertial Force Using ARM Microcontroller | 87 |
| Mehran Mozaffari-Jovein - Seyyed Alireza Davodi-Navokh
Behnam Moetakef-Imani | |

Vol. 34, No.2
Summer 2022