



# Experimental Investigation of Isotropic Flow Generated by Grid in Subsonic Wind Tunnel and Measurement of Characteristics of Turbulent Flow

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Adabi R.<sup>1</sup>,  
Fathali M.<sup>1</sup>,  
Pouryoussefi G.<sup>1\*</sup>,  
Doostmahmoudi A.<sup>1</sup>,  
Amiri Tayebi M.<sup>1</sup>

### How to cite this article

Adabi R, Fathali M, Pouryoussefi G, Doostmahmoudi A, Amiri Tayebi M. Experimental Investigation of Isotropic Flow Generated by Grid in Subsonic Wind Tunnel and Measurement of Characteristics of Turbulent Flow. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(03):191-200.

<sup>1</sup> Department of Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

### \*Correspondence

Address: Department of Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

pouryoussefi@kntu.ac.ir

### Article History

Received: August 22, 2021  
Accepted: July 12, 2021  
ePublished: January 28, 2022

## ABSTRACT

In this research, the turbulent isotropic flow has been experimentally investigated. Hence, two different grids are made and a contraction channel is installed behind it inside the subsonic wind tunnel to generate anisotropic turbulence flow. The grids with mesh sizes of 2/54 cm and 5/08 cm were cut on the wood with an obstruction ratio of 0/34 and 0/17, respectively. One-dimensional hot wire was used to determine the perturbation velocities in the direction of flow, and an approximation was used to determine the components of other directions. At speeds of 5 m/s and 10 m/s, experiments were performed for each of the grids, which range from a Reynolds number of 8500 to about 33000. To determine the onset of the isotropic location, methods of velocity skewness, kurtosis, turbulence intensity, dissipation rate, and longitudinal scales such as Kolmogorov and Taylor lengths were used. For skewness and kurtosis, the numbers show 0 and 3, respectively, which indicate the isotropic flow. Results showed that with increasing the velocity, the isotropy of the flow was delayed. Also, in a grid with a lower obstruction ratio, the intensity of turbulence will be less near the grid, but as it moves away from the grid, the intensity of turbulence will increase.

**Keywords** Isotropic Turbulence, Homogeneous Flow, Grid, Obstruction Ratio, Contraction Channel, Wind Tunnel.

## CITATION LINKS

[1] Decay of turbulence generated by a square-fractal-element grid. [2] Role of rigid boundary on the decay of turbulence generated by passive-grid for free surface flow. [3] Turbulent flow [4] The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence. [5] Statistical theory of turbulenc. [6] Experimental investigation and analysis of the velocity variations in turbulent flow. [7] Small axisymmetric contraction of grid turbulence. [8] Decay of vorticity in isotropic turbulence. [9] The decay power law in grid-generated turbulence. [10] Turbulent Flows. [11] Scalings and decay of fractal-generated turbulence. [12] Large scale homogeneous turbulence and interactions with a flat-plate cascade. [13] Turbulence without richardson–kolmogorov cascade. [14] Intermittency and Reynolds number. [15] The spatial origin of  $-5/3$  spectra in grid-generated turbulence.

## بررسی تجربی جریان ایزوتروپ تولید شده توسط توری در تونل باد مادون صوت و اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان آشفته

رضا ادبی

مهندسی هوافضا-آیرودینامیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

مانی فتحعلی

مهندسی هوافضا-آیرودینامیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

غلامحسین پوریوسفی\*

مهندسی هوافضا-آیرودینامیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

علیرضا دوست‌محمودی

مهندسی هوافضا-آیرودینامیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

مصطفی امیری طیبی

مهندسی هوافضا-آیرودینامیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

در این پژوهش به بررسی تجربی جریان آشفته ایزوتروپ پرداخته شده است. به همین منظور، دو توری متفاوت با یک کانال انقباضی در پشت آن‌ها برای ایجاد یک جریان آشفته ایزوتروپ در داخل تونل باد تعبیه شده است. توری‌ها با شبکه‌های ۲/۵۴ سانتی‌متر و ۵/۰۸ سانتی‌متر به ترتیب با نسبت انسداد ۰/۳۴ و ۰/۱۷ با برش لیزر روی چوب برش داده شده‌اند. برای تعیین سرعت‌های اغتشاشی در جهت جریان از جریان‌سنج سیم داغ یک‌بعدی استفاده شده و برای تعیین مولفه‌های جهت‌های دیگر از تقریب استفاده شده است. در سرعت‌های ۵ متربرثانه و ۱۰ متربرثانه برای هر یک از توری‌ها آزمایش انجام شده که بازه عدد رینولدز ۸۵۰۰ تا حدود ۳۳۰۰۰ را در بر می‌گیرد. برای تعیین آغاز مکان ایزوتروپی از روش‌های تعیین چولگی سرعت، همواری سرعت، شدت اغتشاشات، نرخ اضمحلال و مقیاس‌های طولی مانند طول کولموگروف و تیلور استفاده شده است. برای چولگی و همواری اعداد به ترتیب ۰ و ۳ را نشان داده که نشان‌دهنده جریان ایزوتروپ می‌باشد. نتایج نشان دادند که با افزایش سرعت ورودی، ایزوتروپ شدن جریان به تعویق افتاده است. همچنین در شبکه با نسبت انسداد کمتر، در نزدیکی توری شدت اغتشاش کمتر خواهد بود ولی با دور شدن از توری، شدت اغتشاشات بیشتر شده است.

**کلیدواژه‌ها:** آشفته‌گی ایزوتروپ، جریان همگن، توری، نسبت انسداد، کانال انقباض، تونل باد

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۰

\*نویسنده مسئول: pouryoussefi@kntu.ac.ir

### ۱- مقدمه

جریان آشفته (Turbulence flow) در همه جای مسائل آیرودینامیک و علم سیالات مانند اطراف هواپیماها، بال‌های وسایل هوایی، داخل موتورهای درون‌سوز و جت‌ها، توربین‌های باد و غیره حاضر است، ولی هنوز درک فیزیکی کاملی از این جریان

موجود نیست. این مسأله اهمیت پرداختن به جریان آشفته را نشان می‌دهد. ریچارد فینمن برنده جایزه نوبل، مسئله آشفته‌گی را مسئله‌ای حل نشده در فیزیک کلاسیک می‌داند. هاینبرگ دانشمند مکانیک کوانتوم و دینامیک سیالات می‌گوید هنگامی که از دنیا رقتم دو سوال از خداوند دارم، نسبت چیست؟ آشفته‌گی چیست؟ و اوست که قطعاً برای اولین بار جواب خواهد داد. از این‌رو پرداختن به مسئله آشفته‌گی می‌تواند به‌روز باشد و درک ما را از جریان آشفته بهتر کند<sup>[1]</sup>. آشفته‌گی حالتی از حرکت سیال است که توسط حرکات نامنظم و تصادفی مشخص می‌شود. به علت نوع هندسه و یا بالا رفتن عدد رینولدز و غیره، نیروهای اینرسی بر نیروهای لزجت غالب شده و اختلالات با طول موج‌ها و فرکانس معین تشدید می‌شوند. اختلالات رشد کرده و درهم می‌شکنند و سیال از حالت لایه‌ای خود خارج می‌گردد. در واقع نیروهای اینرسی باعث می‌شوند که نیروهای لزجت بین لایه‌های سیال کاهش یافته و اختلالات، میرا نگرند و بدین صورت لایه‌های سیال در حالت اندرکنش با یکدیگر قرار گیرند و حرکت سیال به صورت حرکت توده‌هایی از سیال انجام گیرد و جریان آشفته شود. جریان‌های آشفته دارای نوسانات نامنظم سرعت با فرکانس بسیار بالا در هر سه جهت با شدت‌های متغییر وجود دارد. شدت نوسانات عموماً تا حدود ۱۰٪ سرعت متوسط می‌توانند باشند. جریان آشفته با خصوصیت حرکت بی‌نظم و آشوبناک گردابه‌ها (Eddy) شناخته می‌شود.

تا کنون نظریه‌ها و فرضیات گوناگون، ولی با یک ماهیت موضوعی مشترک مطرح شده و ما را در درک بهتر جریان‌ات آشفته کمک می‌کند. از شاخص‌ترین نظریه‌ها می‌توان به فرض جریان همگن ایزوتروپ (Isotropic Homogeneity Flow) اشاره کرد. در مطالعه تئوری جریان‌های آشفته اکثراً از فرض همگنی استفاده می‌شود. با این فرض می‌توان به ساده‌سازی معادلات پرداخت و مهم‌تر از همه، امکان استفاده از تحلیل طیفی آشفته‌گی فراهم می‌گردد. تحلیل طیفی آشفته‌گی روش تئوری بسیار خوبی است که می‌توان با آن مقیاس‌های مکانی مختلف در آشفته‌گی را تشریح نمود. هیچ جریان آشفته‌ای در واقع همگن نیست ولیکن می‌توان با تقریب خوبی یک جریان آشفته همگن تولید نمود. با استفاده از فرض همگنی در جریان‌های آشفته می‌توان راحت‌تر به توسعه تئوری‌ها در آشفته‌گی پرداخت.

با دستاوردهایی که در چنین جریان‌های ایده‌الی به خصوص در مورد مقیاس‌های کوچک به دست می‌آید، می‌توان درک بهتر و عمیق‌تری از ماهیت جریان‌های واقعی غیر همگن به دست آورد<sup>[2,3]</sup>. در صورتی که جریان آشفته در تمام محدوده جریان دارای ساختار کمیتی یکسانی باشد، آشفته‌گی را همگن گویند. بنابراین با در نظر گرفتن دو نقطه (۱) و (۲) در میدان جریان، در صورتی که رابطه زیر در این دو نقطه حاکم باشد، آشفته‌گی همگن خواهد بود.

با انقباضی که پشت توری قرار دادند توانستند روند ایزوتروپ شدن جریان را تسریع بخشند. نسبت انقباض (Contraction Ratio) استفاده شده در مطالعات آن‌ها ۰/۸:۱ بود. آن‌ها دو نوع توری از جنس‌های مختلف چوب و فلز را در آزمایش‌های خود مورد استفاده قرار دادند. دو توری از نظر هندسه نیز در دو نوع مقطع دایره و مستطیل بودند<sup>[۶]</sup>. آنها با جریان سنج سیم داغ در محور مرکزی x تونل باد از توری دور شده و شروع به اندازه‌گیری  $u^2$ ،  $v^2$ ،  $w^2$  کردند. آن‌ها از پراب x شکل یعنی دو سیم متقاطع با هم، که زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم دارند برای اندازه‌گیری سرعت‌های اغتشاشی استفاده کرده و با این پراب مولفه‌های  $v^2$  و  $u^2$  را اندازه گرفتند و با چرخش پراب حول محور x و با تقریب و معادلاتی  $w^2$  را نیز اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که در ناحیه غیر ایزوتروپ جریان نسبت سرعت‌های اغتشاشی  $w^2 = v^2 \approx u^2/1.4$  می‌باشد. در این پژوهش از نسبت سرعت‌های اغتشاشی در ناحیه غیر ایزوتروپ استفاده می‌شود. چون پراب دستگاه سرعت‌سنج سیم داغ در اختیار ما، یک پراب یک بعدی است که  $u_x$  را که متشکل از سه مولفه دیگر است اندازه‌گیری می‌کند. در سال ۱۹۶۵ کومت بلوت و کورسین با همکاری یکدیگر اولین کسانی بودند که با یک انقباض کوچک بعد از توری با نسبت ۱:۱/۲۴ توانستند به جریان ایزوتروپ برسند و مولفه‌های آشفتگی را به راحتی اندازه‌گیری کنند. آنها نسبت سرعت‌های اغتشاشی  $u/v$  را اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که بدون انقباض، فرایند اضمحلال بسیار کند است و گردابه‌های بسیار بزرگی در داخل تونل باد بوجود می‌آیند و به عبارتی آرام شدن این گردابه‌ها زمان بیشتری را سپری می‌کند. سپس نسبت سرعت‌های اغتشاشی  $u/v$  را با در نظر گرفتن محفظه انقباض بعد از توری اندازه‌گیری کردند و دیدند که محفظه انقباض باعث نزدیک شدن دو سرعت اغتشاشی  $u$  و  $v$  به یکدیگر می‌شوند و این یعنی جریان به ایزوتروپ شدن نزدیک‌تر می‌شود<sup>[۳]</sup>. در سال ۱۹۴۶ پچلور و تاسند، اضمحلال اغتشاشات در آشفتگی ایزوتروپ را مورد مطالعه قرار دادند. آنها ترم‌های مختلف معادله اغتشاش را با استفاده از تونل باد با دو توری بوسیله دستگاه جریان‌سنج سیم داغ اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که دو اثر در تغییرات اغتشاشات دخیل است. سهم منفی این اثر، اثر لزجت و سهم مثبت آن حرکت تصادفی خطوط گردابه‌ها هستند، که این اثرات می‌تواند به چولگی (Skewness) و تابع توزیع احتمال مرتبط باشد<sup>[۸]</sup>.

در سال ۱۹۹۰ محمد و لارو درباره قانون قدرت اضمحلال پشت توری تولید آشفتگی تحقیق کردند. آنها تاثیرات شرایط اولیه را روی توان اضمحلال و ضریب آن و مبدا واقعی قانون قدرت اضمحلال برای تغییرات واریانس‌های سرعت آشفتگی برای توری‌های با مقطع گرد و مربعی بررسی کردند. محدوده مطالعاتی آنها در اعداد رینولدر ۶۸۰۰ تا ۶۰۰۰ با طول شبکه‌های توری ۲/۵۴ سانتی‌متر و ۵/۰۸ سانتی‌متر و با نسبت انسداد ۰/۳۴ و ۰/۴۴ بود. آنها روی موقعیت

$$(\overline{u^2})_1 = (\overline{u^2})_2; (\overline{v^2})_1 = (\overline{v^2})_2; (\overline{w^2})_1 = (\overline{w^2})_2 \quad (1)$$

جریان آشفته در پایین دست توری درون اتاق آزمون یک تونل باد، با تقریب بسیار خوبی ایزوتروپ و همگن می‌باشد. زیرا میرایی آشفتگی به کندی صورت می‌گیرد. البته لازم است که خاطر نشان کرد با اینکه بسیاری از جریان‌های آشفته را می‌توان تقریباً ایزوتروپ در نظر گرفت ولیکن ایزوتروپی و همگنی کامل، غیر قابل دسترسی می‌باشد<sup>[۳,۴,۵]</sup>. یکی دیگر از تقارن‌های مهم آماری، ایزوتروپی جریان آشفته است. جریان آشفته ایزوتروپ در بسیاری موارد حتی از جریان آشفته همگن نیز ایده‌آل‌تر می‌باشد و اکثراً برای ساده‌سازی تجزیه و تحلیل آشفتگی از این فرض استفاده می‌شود. چنین فرضیاتی برای مطالعه خواص آشفتگی بدون وارد شدن در محاسبات جزئیات و در نتیجه ساده نمودن تحلیل‌ها به کار می‌روند. در صورتی که در جریان‌های آشفته، پارامترهای متوسط آماری در هیچ جهتی نسبت به هم ارجحیت نداشته باشند و یا به عبارتی با دوران محورهای مختصات بدون تغییر باقی بمانند. جریان آشفته را همسانگرد یا ایزوتروپ گویند. بنابراین در یک نقطه درون جریان آشفته ایزوتروپ خواهیم داشت:

$$\overline{u^2} = \overline{v^2} = \overline{w^2} \quad (2)$$

در جریان‌های آشفته ایزوتروپ به دلیل عدم وجود گردان‌های سرعت متوسط، تنش‌های برشی آشفتگی برابر با صفر است. در بسیاری از کارهای مطالعاتی بر روی آشفتگی در غیاب جریان متوسط، با آشفتگی همگن از همان ابتدا به عنوان آشفتگی ایزوتروپ برخورد می‌شود. با وجود اینکه آشفتگی همگن رو به سوی آشفتگی ایزوتروپ دارد ولیکن در شروع، آشفتگی کم و بیش غیرایزوتروپ است. ایزوتروپی نقش بسیار مهمی در مطالعه آشفتگی چه به عنوان یک شاخص عمومیت و چه جهت ساده‌سازی برای تخمین کمیت‌های مهم با تعداد محدودی اندازه‌گیری دارد<sup>[۳]</sup>. در سال ۱۹۳۵ تیلور تئوری جریان ایزوتروپ و معادلات حاکم بر مشخصه‌ها و پارامترهای جریان ایزوتروپ را ارائه کرد که می‌توان به عدد رینولدز، شدت آشفتگی (Turbulence Intensity) و نرخ اضمحلال (Decay) اشاره کرد<sup>[۵]</sup>. برای درک اولیه جریان آشفته، بایستی یک جریان متعارف را ایجاد کرد تا بتوان نظریه‌های مطرح شده و تعاریف انجام شده را در برگیرد. بدین منظور از شبکه‌های توری تولید آشفتگی (Grid Turbulence Generator) برای آشفته کردن جریان ورودی در تونل باد استفاده می‌شود.

سیمونز و سالتر (۱۹۳۳) را می‌توان اولین کسانی دانست که از توری برای ایجاد جریان آشفته استفاده کرده و اندازه‌گیری سرعت‌های اغتشاشی را با جریان سنج سیم داغ انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که با دور شدن از توری، شدت اغتشاشات کاهش می‌یابد<sup>[۶]</sup>. در سال ۱۹۶۵ اوبری و والیس با استفاده از توری و یک انقباض کوچک مولفه‌های آشفتگی را اندازه‌گیری کردند. آنها



شکل ۱) تونل باد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

12 بیتی ۱۶ کاناله ساخت National Instruments (NI) مدل PCI-6024E، و یک دستگاه کامپیوتر شخصی استفاده شده است. بیشینه عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت توسط جریان‌سنج سیم داغ در حدود ۰/۵٪ تخمین زده شده است. پاسخ فرکانسی این دستگاه نیز حدود ۴۰ کیلوهرتز بوده است. تنها مشکلی که برای ایجاد جریان آشفته ایزوتروپ وجود دارد، کوتاه بودن طول اتاق آزمون تونل‌باد بوده و برای ایجاد این جریان به یک اتاق آزمون طویل نیازمند بوده‌ایم. برای ایجاد جریان ایزوتروپ و برطرف کردن این مشکل، از انقباض برای تسریع در ایزوتروپی جریان استفاده شده است. برای این کار، بعد از طراحی توری، محفظه انقباض ساخته شده است. سپس با کوچک‌تر شدن محفظه انقباض، کانالی با ابعاد کوچکتر از ابعاد اتاق آزمون ساخته شده است. در ابتدا توری با فاصله ۲۰ سانتی‌متر از لوله پیتوت نصب شده و برای تثبیت آن از قاب و تسمه در تونل‌باد استفاده شده است. بعد از یک فاصله ۳۵ سانتی‌متر از توری، محفظه انقباض نصب و به محفظه مستقیم وصل شده است.

وقتی مشتق سرعت متوسط وجود نداشته باشد، جریان آشفته، همگن است و تولیدی در آن نیست ( $P=0$ ). با عبور دادن جریان هوای یکنواخت از بین یک توری در تونل باد می‌توان به یک تقریب مناسب از نرخ اضمحلال آشفته همگن دست یافت که در شکل ۲ نشان داده شده است (توری با مشخصه  $M$  مشخص می‌شود)<sup>[10]</sup>. در چارچوب آزمایشگاه جریان از نظر آماری ثابت است و فقط در جهت  $x$  در خط مرکزی جریان متفاوت است. با حرکت کردن از توری با سرعت  $U$  جریان به حد کافی همگن شده و با زمان ( $t = x/U$ ) تکامل پیدا می‌کند.

کومت بلوت و کورسین در سال ۱۹۶۶ با استفاده از این نوع توری توانستند واریانس سرعت را اندازه‌گیری کنند. تقارن در آزمایش بسیار ایده‌آل است و نشان می‌دهد که واریانس‌های سرعت در سه جهت مساوی است و تنش برشی در این ناحیه صفر است. آنها دریافتند که ممکن است سرعت محوری ۱۰٪ بیشتر از سرعت جانبی باشد.

جریان ایزوتروپ و همگن آزمایشاتی انجام دادند و پارامترهای دخیل در این جریان را پیدا کردند. پارامترهای اثبات وجود جریان ایزوتروپ و همگن را در مقادیر پایین چولگی سرعت، پایداری در چولگی مشتق سرعت و تعادل در معادله انرژی جنبشی آشفته‌گی دانستند. اینها همگی مستقل از توان اضمحلال و شرایط اولیه از قبیل عدد رینولدز، اندازه توری و نسبت انسداد بودند<sup>[9]</sup>.

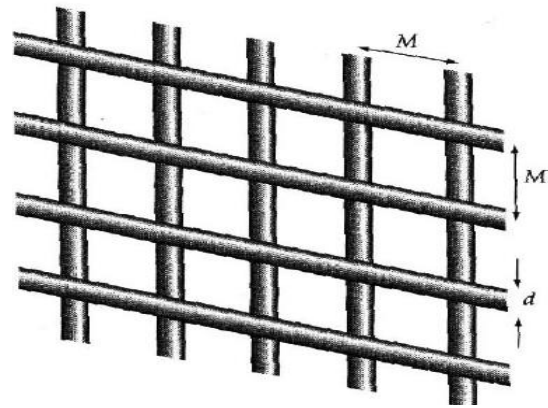
از آنجا که جریان آشفته در همه جای صنعت و مهندسی وجود دارد و قطعات دوار و متحرک در معرض جریان آشفته هستند، شناخت این جریان از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش به بررسی تجربی جریان آشفته ایزوتروپ پرداخته شده است. به همین منظور، دو توری متفاوت ساخته شده و با یک کانال انقباضی در پشت آن در داخل تونل‌باد برای ایجاد یک جریان آشفته ایزوتروپ تعبیه شده است. توری‌ها با اندازه شبکه‌های ۲/۵۴ سانتی‌متر و ۵/۰۸ سانتی‌متر به ترتیب با نسبت انسداد ۰/۳۴ و ۰/۱۷ با برش لیزر روی چوب برش داده شده‌اند.

## ۲- روش تحقیق

مطالعات جریان‌های آشفته را می‌توان به چند دسته تحلیلی، عددی و تجربی تقسیم کرد که حل تحلیلی آن، به علت تصادفی بودن، نفوذپذیری و اتلاف‌پذیری، کار بسیار مشکلی است. حل عددی جریان آشفته نیز مستلزم امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری می‌باشد. روش تجربی نیازمند به تونل‌باد مناسب و دستگاه اندازه‌گیری سرعت جریان است. با استفاده از تونل باد می‌توان آزمایش‌ها و پژوهش‌های وسیعی را در علوم مختلف نظیر هوافضا، مکانیک سیالات، محیط زیست، عمران، خودرو و همچنین صنایع نظامی و غیر نظامی انجام داد. آزمایشات در تونل باد سرعت پایین و مدار باز دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی انجام گرفته است که دارای اتاق آزمون با مقطع عرضی  $۱/۲ \times ۱$  متر و طول اتاق آزمون ۳ متر بوده است. بیشترین سرعت در اتاق آزمون این تونل تا ۷۰ متربرثانیه می‌توانست باشد. تحت شرایط جریان یکنواخت، شدت اغتشاشات جریان آزاد طولی کمتر از ۱۵٪ و غیریکنواختی سرعت در عرض اتاق آزمون ۰/۵٪ بوده است (شکل ۱). برای اندازه‌گیری کمی و کیفی جریان هوای آشفته در داخل تونل باد، نیاز به دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان هوا می‌باشد. یکی از تجهیزات اصلی مطالعه جریان هوا در تونل‌باد، دستگاه جریان‌سنج سیم داغ است. در آزمایش‌های تونل باد، برای اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای با فرکانس بالا و تعیین تغییرات بسیار سریع، از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری فرکانس‌های ریزش گردابه‌ها از یک دستگاه جریان‌سنج سیم داغ (Hotwire) از نوع دما ثابت (CTA) به همراه نرم‌افزار Rake FlowWare ساخت شرکت فرا سنجش صبا (FSS)، یک عدد پراب ساده یک بعدی (تک سنسوری) مدل WU11-SN، یک دستگاه برد الکترونیکی (A/D)

بعنوان توری با شبکه  $M=۵/۰۸$  سانتی متر استفاده می شود. طبق تئوری گردابه گسسته، پرانتل و بچلور نمودارهای شکل ۴ را ارائه دادند تا مشخص کنند که با یک جریان غیرایزوتروپ اولیه چه مقدار نسبت انقباض لازم است تا جریان ایزوتروپ شود [12].

اوبری در آزمایشات خود از انقباض  $۱:۰/۷۸$  و کومت بلوت از انقباض  $۱:۰/۲۷$  و هرست از انقباض  $۱:۰/۲۳$  در تونل باد برای رسیدن به جریان ایزوتروپ استفاده کرده اند. در این تحقیق از انقباض



شکل ۲) توری میله ای

آنها با کمی اصلاح تنش نرمال را مساوی کرده و به یک جریان همگن ایزوتروپ دست پیدا کنند. در محیط آزمایشگاهی می توان از معادله (۳) استفاده کرد [۱۰].

$$\frac{k}{U} = A \left( \frac{x - x_0}{M} \right)^{-n} \quad (3)$$

n را توان اضمحلال گویند که مقادیر مختلفی بین ۱/۱۵ الی ۱/۴۵ دارد، اما محمد و لارو در سال ۱۹۹۰ آن را ۱/۳ محاسبه کردند که با تمامی داده ها تجربی سازگار است [9]. می توان توری ها را به دو قسمت کلاسیک و فراکتال تقسیم بندی کرد. در تقسیم بندی کلاسیک، توری های ساده با سطح مقطع دایره و یا مربع را می توان قرار داد که می توانند مسطح یا غیر مسطح باشند [1,11]. در این پژوهش دو توری مورد استفاده قرار گرفته است. در ابتدا از توری کلاسیک تخت استفاده شده است. جنس توری از چوب MDF با ضخامت ۶ میلی متر انتخاب شده و با لیزر برش خورده است. همانطور که در شکل ۳ ب نشان داده شده است از سوراخ های مربعی با طول ۲/۵۴ سانتی متر استفاده شده که یک توری با سوراخ های ریز به حساب می آید. در تعریف توری از نسبت انسداد مش و ضخامت بین سوراخ ها بوده و بصورت فرمول (۴) تعریف می شود.

$$\sigma = \left( \frac{d}{M} \right) \left( 2 - \frac{d}{M} \right) \quad (4)$$

برای توری کلاسیک مورد نظر  $M=۲/۵۴$  سانتی متر و  $d=۰/۴۷۶$  و  $\sigma=۰/۳۴$  در نظر گرفته شده است. در مطالعات قبلی از توری های با طول مش متفاوت و طراحی مختلف استفاده شده و نسبت انسداد ثابت نگه داشته شده است، ولی در این تحقیق طول مش دو برابر شده و نسبت انسداد نصف شده است تا تاثیرات نسبت انسداد را در تغییرات جریان مشاهده کرد. بدین منظور طول مش به  $۵/۰۸$  سانتی متر تغییر داده شده و  $d$  همان  $۰/۴۷۶$  نگه داشته شده تا نسبت انسداد  $۰/۱۷$  باشد. در شکل ۳ ب شبکه توری با نسبت انسداد نصف نسبت به توری اول نشان داده شده است. از این به بعد از G1 بعنوان توری با شبکه  $M=۲/۵۴$  سانتی متر و از G2

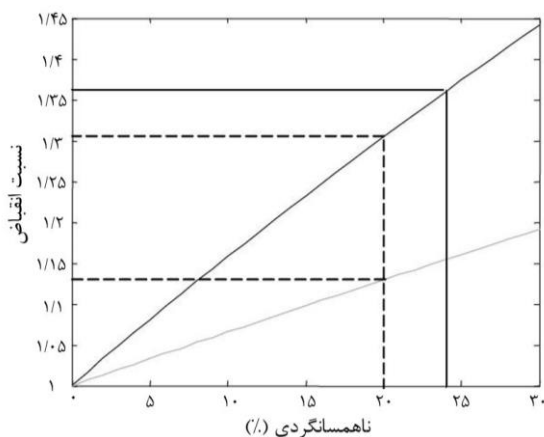


(الف)

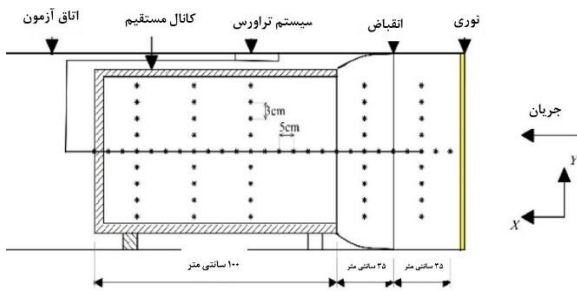


(ب)

شکل ۳) توری مسطح نصب شده در داخل تونل باد با نسبت انسداد الف: ۰/۱۷ و ب: ۰/۳۴



شکل ۴) انقباض مورد نیاز برای تبدیل جریان غیرایزوتروپ به ایزوتروپ [11]



شکل ۶) مسیر پیمایش در جهت x,y

۳-۱- چولگی و همواری سرعت

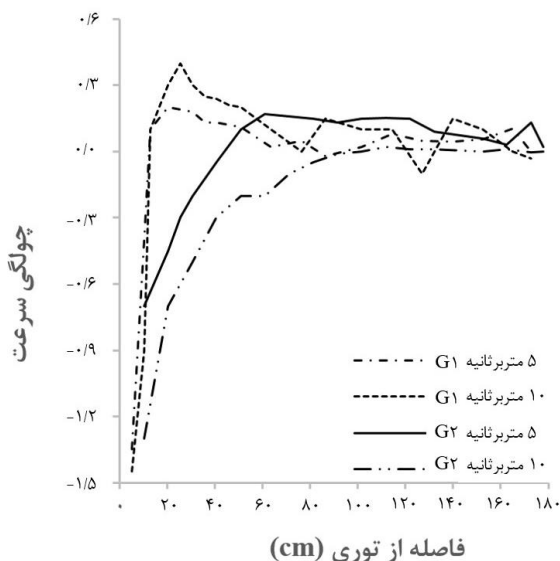
چولگی نسبت ممان مرکزی سوم به توان سوم انحراف از معیار می‌باشد:

$$S_u = \frac{\overline{u^3}}{\overline{u}^2} \quad (5)$$

نامتقارنی نشانگر عدم تقارن توزیع سرعت آنی حول سرعت متوسط می‌باشد. اگر  $S > 0$ ، نوسانات مثبت غالب می‌باشند و اگر  $S < 0$ ، نوسانات منفی. K معرف همواری می‌باشد و اطلاعات محدودی در مورد کشیدگی و پهنای دنباله نوسانات ارائه می‌کند:

$$F_u = K_u = \frac{\overline{u^4}}{\overline{u}^2} \quad (6)$$

با توجه به اینکه تغییرات جزئی در شرایط اولیه جریان آشفتته باعث تغییرات در نتایج بدست آمده می‌شود و اگر باز هم شرایط اولیه را رعایت کنیم، نتایج یک هر تست با تست قبلی فرق دارد؛ پس در اینجا نمی‌توان روی اعداد به دست آمده بحث کرد و نتایج بیشتر روی رفتارهای جریان مقایسه شده است. نتایج بدست آمده در این پژوهش با نتایج محمد و لارو در مبحث چولگی بسیار شباهت داشته و این نتیجه مهم را می‌توان استنباط کرد که با افزایش سرعت ورودی ایزوتروپ شدن جریان به تعویق می‌افتد (شکل ۷).



شکل ۷) مقایسه چولگی سرعت در انسدادها و سرعت‌های جریان متفاوت

تفاوت بین نسبت انقباض ما با کارهای قبلی بخاطر محدودیت تونل باد مورد مطالعه در این تحقیق بوده است. محفظه انقباض به صورت دوتکه ساخته شده و با پیچ به محفظه آزمون وصل شده است. سازه اصلی با ورق گالوانیزه و قاب چوبی ساخته شده و با ورق‌های پلیمری پوشیده شده تا منحنی‌های مورد نظر به خوبی بوجود آیند. (شکل ۵)

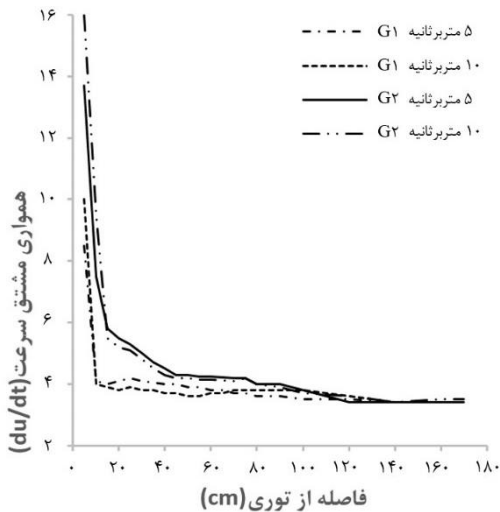
بعد از محفظه انقباض باید محفظه‌ای باشد تا جریان بعد از خروج از انقباض منبسط نشود و رژیم آن بر هم نخورد و اختلاف فشار پیش نیاید. به این منظور ساختار دو تکه از آهن سبک با جوش آرگون ساخته شده که در ابتدا از استحکام خوبی برخوردار باشد و نیز بتوان مکانیزم دیواره‌های کشویی را برای نصب و تغییرات تنظیمات در حال آزمایش را پیاده کرد. در کف ساختار زیرین محفظه مستقیم پایه‌هایی تعبیه شده تا محفظه اندازه‌گیری سرعت دقیقاً در وسط سطح مقطع تونل باد قرار گیرد. ابعاد ورودی محفظه ۷۸×۹۴ سانتی‌متر و طول آن ۱۰۰ سانتی‌متر بوده است.

۳- تشریح نتایج و بحث

آزمایشات در دو سرعت ۵ متربرثانیه و ۱۰ متربرثانیه برای دو نوع توری معرفی شده انجام شده است. برای تعیین فرکانس داده‌برداری طبق قانون نایکویست باید حداقل دو برابر فرکانس موجود در جریان مد نظر باشد تا بتوان فرکانس مورد نظر را بخوبی اندازه‌گیری کرد. فرکانس داده برداری در ۱۰ کیلوهرتز و زمان داده‌برداری ۲۰ ثانیه انتخاب شده که در هر نقطه ۲۰۰۰۰۰ داده برداشت شده است. میدان سرعت در جهت x با فواصل ۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده و در جهت عمود ۳ سانتی‌متر فواصل اندازه‌گیری بوده است. در جهت x تا فاصله ۱۷۰ سانتی‌متر از توری پیمایش شده و میدان سرعت اندازه‌گیری شده است. در هر بار انجام آزمایش، تونل باد و دستگاه جریان‌سنج سیم داغ کالیبره شده‌اند. در شکل ۶ مسیر پیمایش انتقال دهنده پراب نشان داده شده است.



شکل ۵) محفظه انقباض



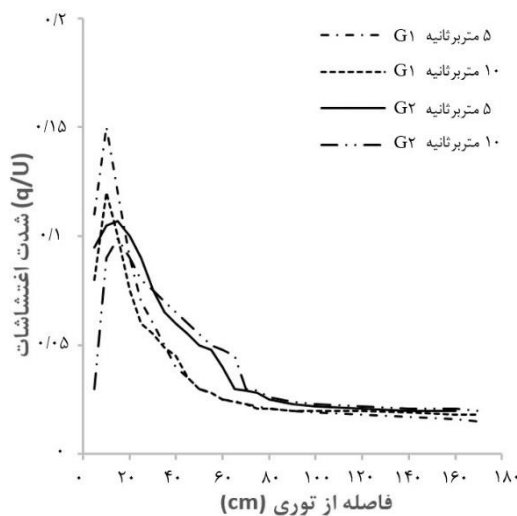
شکل ۱۰) مقایسه همواری مشتق سرعت در انسدادها و سرعت‌های جریان متفاوت

### ۳-۳- شدت اغتشاشات

برای معرفی یک جریان آشفته از طول مقیاس و شدت آشفتگی باید استفاده کرد، این یعنی شدت آشفتگی از اهمیت بسیار بالایی در مطالعات جریان‌های آشفته دارد. بطور مثال یک رودخانه آرام با سرعت بالا را نمی‌توان با یک رودخانه خروشان از نظر آشفتگی یکی دانست و واضح است که رودخانه خروشان از شدت آشفتگی بالاتری برخوردار است (معادله ۷) [10].

$$T_u = 100 \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{U}} \quad (7)$$

همانطور که توقع می‌رفت و کارهای قبلی نشان می‌داد، روند کاهش اغتشاشات بعد از دور شدن از شبکه عدد ۰/۱ الی ۰/۲ را نشان داده که دقیقاً مطابق کارهای قبلی است [کروگستاد و دیویدسون]. همینطور که در نمودار کلی شکل ۱۱ مشاهده شده است در شبکه با انسداد کمتر در نزدیکی شبکه شدت اغتشاش کمتری وجود داشته ولی با دور شدن شدت اغتشاشات بیشتر شده و بالعکس.

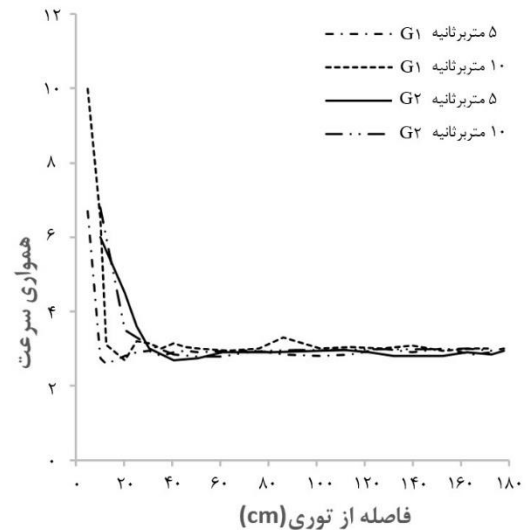


شکل ۱۱) مقایسه شدت اغتشاشات کلی در انسدادها و سرعت‌های جریان متفاوت

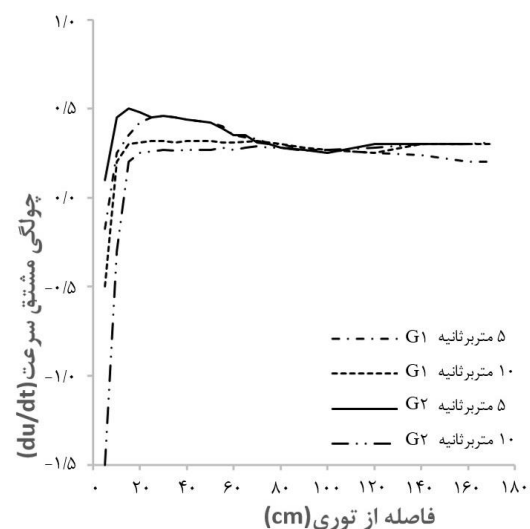
در مورد همواری نیز این نتیجه مهم از روی نتایج بدست آمده که حساسیت کمتری نسبت به چولگی دارد. برای شبکه دوم نتایج کمی قابل قبول نبوده و در سرعت ۵ متربرثانیه جریان ایزوتروپ نشده و چولگی به صفر بیشتر نزدیک نشده است. و این می‌تواند از حساسیت دستگاه اندازه‌گیری باشد که نتوانسته در سرعت پایین در شبکه با نسبت انسداد پایین حساسیت لازم برای اندازه‌گیری سرعت‌های اغتشاشی را داشته باشد (شکل ۸).

### ۳-۲- چولگی و همواری مشتق سرعت

چولگی و همواری مشتق سرعت برای تمامی آزمایشات انجام شده در حدود ۰/۳ الی ۰/۵ بدست آمده است که شرط ایزوتروپ موضعی را ثابت می‌کند. همانطور که در شکل ۹ و شکل ۱۰ مشاهده شده در دو نوع شبکه با چهار عدد رینولدز، چولگی سرعت در فاصله ۵۰ سانتی‌متر از شبکه تولید آشفتگی به هم رسیده و ثابت شده است.



شکل ۸) مقایسه همواری سرعت در انسدادها و سرعت‌های جریان متفاوت



شکل ۹) مقایسه چولگی مشتق سرعت در انسدادها و سرعت‌های جریان متفاوت

۳-۴- نرخ اضمحلال

نرخ اضمحلال با استفاده از فرضیه تیلور و اندازه‌گیری سرعت‌های اغتشاشی نسبت به زمان بصورت معادله (۸) ارائه شده است [10].

$$\varepsilon = \frac{15\nu}{U^2} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{(\dot{u}_{i+1} + \dot{u}_i)}{\Delta t} \right] \quad (8)$$

نرخ اضمحلال با دور شدن از شبکه آشفته کاهش پیدا می‌کند و این امر در همه کارهای گذشته و بصورت تئوری اثبات شده است. نرخ اضمحلال طبیعتاً در جریانی که انرژی بیشتری دارد، بیشتر است. در سرعت ۵ متربرثانه نرخ اضمحلال به مراتب کوچکتر از سرعت ۱۰ متربرثانه بوده و با تغییر شبکه تولید آشفتگی، در یک سرعت ثابت و نسبت انسداد نصف شده، باز هم نرخ اضمحلال بیشتر بوده و می‌توان نتیجه گرفت که شبکه با نسبت انسداد کمتر نرخ اضمحلال بالاتری دارد (شکل ۱۲).

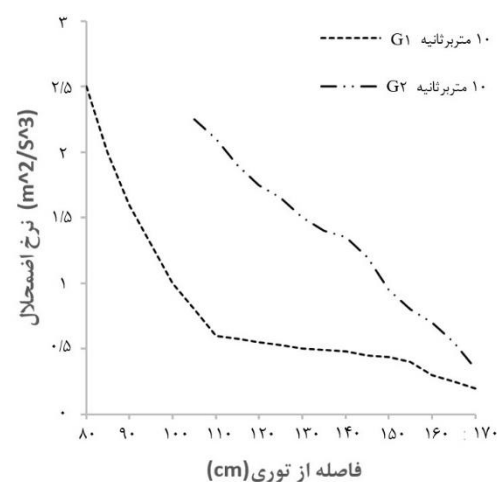
۳-۵- طول کولموگروف و تیلور

مقیاس طولی کولموگروف اهمیت زیادی در تعیین مقدار فرکانس‌های داده برداری و قطع دارد و بصورت معادله (۹) می‌توان آن را بعد از اندازه‌گیری سرعت‌ها بدست آورد [13].

$$\eta = \left( \frac{\nu^2}{15 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

همانطور که در معادله بالا مشخص است، طول کولموگروف نسبت به تغییرات سرعت نسبت به مکان اندازه‌گیری می‌شود. از آنجا که در اینگونه اندازه‌گیری‌ها نیاز به تعداد پراب بیشتر از یک عدد می‌باشد که در فواصل مختلف از هم این کار را انجام دهند و یا با یک پراب در فواصل خیلی کم از هم (چند میلی‌متر) و این کار نیز به زمان و هزینه بالا نیازمند است. از اینرو با استفاده از تئوری منجمد تیلور طول کولموگروف را نسبت به تغییرات سرعت در زمان محاسبه می‌شود (معادله ۱۰) [14].

$$\eta = \left( \frac{\nu^2 \bar{U}^2}{15 \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

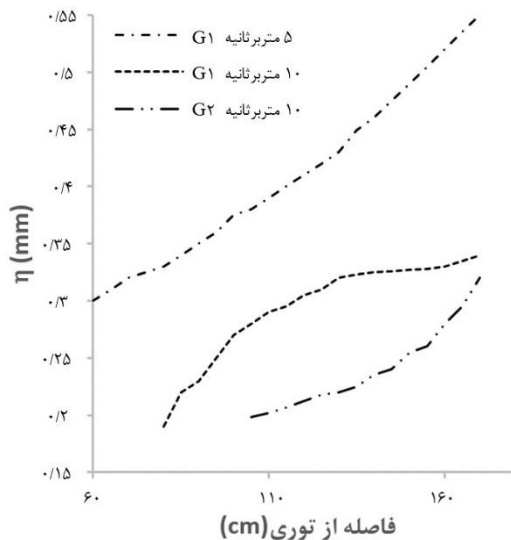


شکل ۱۲) مقایسه نرخ اضمحلال جریان در دو شبکه با انسداد متفاوت

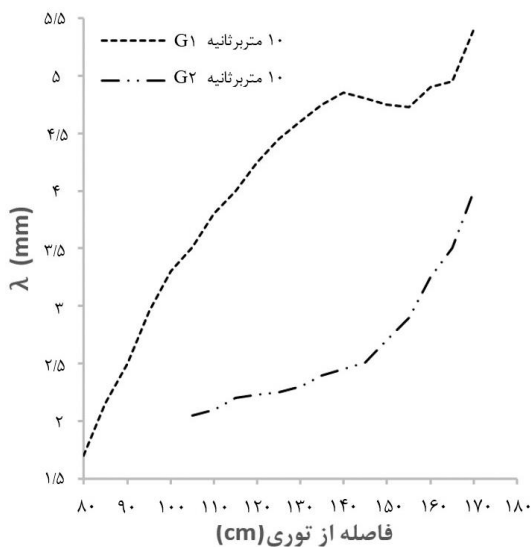
مقیاس تیلور، مقیاسی است بین طول انتگرالی و طول مقیاس کولموگروف که تیلور در سال ۱۹۳۵ بصورت زیر ارائه داد. البته معادله (۱۱) با فرض تیلور نمایش داده شده است [15].

$$\lambda^2 = \frac{U^2 \dot{u}^2}{\left( \frac{du}{dt} \right)^2} \quad (11)$$

به طور کلی می‌توان گفت که تمامی طول‌های مقیاس آشفتگی با دور شدن از شبکه تولید آشفتگی بزرگتر شده و با تغییر سرعت نیز رابطه معکوس دارد (شکل ۱۳). مقیاس‌های بدست آمده طولی در این آزمایشات کاملاً منطبق بر نتایج بدست آمده از محمد و لارو، هرست، لایوو و غیره بوده است که در نمودار شکل ۱۴ رفتار طول با تغییر سرعت در یک نوع شبکه به نمایش در آمده است. و اما با تغییر نسبت انسداد شبکه و ثابت بودن سرعت، مقیاس‌های طولی کاهش پیدا کرده‌اند.



شکل ۱۳) مقایسه طول کولموگروف در انسدادها و سرعت‌های جریان متفاوت



شکل ۱۴) مقایسه طول تیلور در دو شبکه با انسداد متفاوت



G1	۰/۳۴ شبکه تولید آشفته با انسداد
G2	آشفته با انسداد ۰/۱۷ شبکه تولید
$Re_\lambda$	رینولدز نسبت به مقیاس تیلور
$Re_M$	رینولدز نسبت به طول مش
$S(u)$	چولگی سرعت
$S\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)$	چولگی مشتق سرعت
$K(u)$	همواری سرعت
$p$	نرخ تولید

#### علائم یونانی

$\lambda$	طول مقیاس تیلور
$\sigma$	نسبت انسداد
$\sigma_u$	واریانس سرعت
$\eta$	طول مقیاس کولموگروف
$\varepsilon$	نرخ اضمحلال

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از همکاران و خدمات آزمایشگاه آیرودینامیک دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تقدیر و تشکر نمایند.

**تاییدیه اخلاقی:** محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان بوده و تا کنون در مجله دیگری چاپ نشده است؛ همچنین صحت نتایج آن نیز بر عهده نویسندگان مقاله می‌باشد.

**تعارض منافع:** مقاله حال حاضر هیچ‌گونه تعارض منافی با اشخاص و سازمان‌های دیگر ندارد.

**سهم نویسندگان:** رضا ادبی (پژوهشگر اصلی - ۴۰٪)، مانی فتحعلی (پژوهشگر فرعی - ۱۵٪)، غلامحسین پوریوسفی (پژوهشگر فرعی - ۱۵٪)، علیرضا دوست‌محمودی (پژوهشگر فرعی - ۱۵٪)، مصطفی امیری طیبی (پژوهشگر فرعی - ۱۵٪).

**منابع مالی:** هزینه پژوهش از محل منابع شخصی تامین شده است.

#### منابع

- Hearst RJ, Lavoie P. Decay of turbulence generated by a square-fractal-element grid. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014; 741:567-84.
- Raushan PK, Singh SK, Debnath K. Role of rigid boundary on the decay of turbulence generated by passive-grid for free surface flow. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2021; 235(7):1148-64.
- بیژن فرهانیه؛ فیزیک جریانهای آشفته، انتشارات علمی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۸۷.
- Comte-Bellot G, Corrsin S. The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence. *Journal of fluid mechanics*. 1966; 25(4):657-82.
- Taylor GI. Statistical theory of turbulenc. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences*. 1935; 151(873):421-44.
- Simmons LF, Salter C. Experimental investigation and analysis of the velocity variations in turbulent flow. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a*

#### ۴- جمع‌بندی

با توجه به محدودیت‌های مالی و تجهیزاتی سعی شد تجهیزات ساخته شده و شبکه تولید آشفته، مشابه و یا نزدیک به کارهای انجام شده پیشین باشد تا بتوان علاوه بر مقایسه نتایج، مشابه با نتایج تئوری جریان و کارهای عملی پیشین نیز باشد. شبکه تولید آشفته میله‌ای هزینه بسیار بالاتر نسبت به شبکه مسطح چوبی دارد و دیگر معایب سنگینی و غیر منعطف بودن را ندارد. زمان داده‌برداری با توجه به محدودیت امکانات، بسیار کوتاه‌تر از کارهای انجام شده اخیر بوده (کارهای اخیر به مدت ۴ دقیقه داده‌برداری شده است) که این امر روی رزولوشن نمودارهای انرژی و خطاهای محاسباتی تاثیر داشته است. همچنین به علت نبود پراب اندازه‌گیری چندبعدی، از تقریب کارهای انجام شده قبلی در محدوده ایزوتروپ و غیر ایزوتروپ استفاده شده که همین امر نیز تا حدودی در نتایج تاثیر گذار بوده است. بخاطر همین نتایج بدست آمده بیشتر با کارهای دهه‌های گذشته مقایسه شده ولی از نتایج کلی کارهای سالهای اخیر نیز استفاده شده است.

نتایج نشان دادند که جریان همگن کمی زودتر از جریان ایزوتروپ رخ می‌دهد که این فاصله در حدود ۱۰ سانتی‌متر شبکه توری بوده است. در شبکه با نسبت انسداد کمتر شدت اغتشاشات در نزدیکی شبکه بسیار متغییر بوده و کمی دورتر از شبکه به پایداری رسیده است. در دو شبکه با گذشت حدود  $X/M=25$  جریان همگن شده است. جریان ایزوتروپ به صورت کلی غیر قابل دسترسی است، اما می‌توان آن را فرض کرد. بچلور ایزوتروپی را در  $X/M=10$ ، کومت بلوت در  $X/M=40$ ، محمد و لارو در حدود بین ۲۰ الی ۳۰ را برای هر طول مش گزارش کرده و جریان را ایزوتروپ فرض کردند؛ اما هیچ‌یک از آنها چرایی اختلاف بین اعداد به دست آمده را بیان نکردند. در این پژوهش ایزوتروپ موضعی در حدود ۶۰ الی ۸۰ سانتی‌متری از شبکه اتفاق افتاده که معادل  $X/M=10/30$  بوده است. در چولگی سرعت این روند از فاصله ۵۰ سانتی‌متر از شبکه شروع و تا ۱۰۰ سانتی‌متر از شبکه، نسبت به طول مش و سرعت گسترده بوده و تغییرات ایزوتروپی نسبت به سرعت و نسبت انسداد در حدود فاصله ۱۰ سانتی‌متر حادث شده است.

#### ۵- فهرست علائم

U	سرعت جریان
$T_u$	شدت آشفته
$L_u$	طول مقیاس انتگرالی آشفته
T	پریود آشفته
t	ضخامت توری
$\bar{U}$	سرعت متوسط
$u'$	سرعت اغتشاشی طولی
v	سرعت اغتشاشی عرضی
w	سرعت اغتشاشی عمودی
M	طول مش توری
d	طول ضخامت توری

- Mathematical and Physical Character. 1934;145(854):212-34.
- 7- Uberoi MS, Wallis S. Small axisymmetric contraction of grid turbulence. *Journal of fluid mechanics*. 1966; 24(3):539-43.
- 8- Batchelor GK, Townsend AA. Decay of vorticity in isotropic turbulence. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1947;190(1023):534-50.
- 9- Mohamed MS, LaRue JC. The decay power law in grid-generated turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 1990; 219:195-214.
- 10- Pope, S. B. *Turbulent Flows*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.(2000) SIMMONSL, F. G. & SALTERC, 1934 Experimental
- 11- Hurst D, Vassilicos JC. Scalings and decay of fractal-generated turbulence. *Physics of Fluids*. 2007;19(3):035103.
- 12- Larssen JV. Large scale homogeneous turbulence and interactions with a flat-plate cascade (Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University).
- 13- [13] Mazellier N, Vassilicos JC. Turbulence without richardson-kolmogorov cascade. *Physics of fluids*. 2010; 22(7):075101.
- 14- Kahalerras H, Malecot Y, Gagne Y, Castaing B. Intermittency and Reynolds number. *Physics of Fluids*. 1998;10(4):910-21.
- 15- Laizet S, Nedić J, Vassilicos JC. The spatial origin of- 5/3 spectra in grid-generated turbulence. *Physics of Fluids*. 2015; 27(6):065115.