



Numerical Investigation of Pore-Structure in Design of Catalytic Beds for Mono-Propellant Thrusters

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Zhaleh D.¹ MSc,

Ommi F.*¹ PhD,

Saboochi Z.² PhD

How to cite this article

Zhaleh D, Ommi F, Saboochi Z. Numerical Investigation of Pore-Structure in Design of Catalytic Beds for Mono-Propellant Thrusters. Modares Mechanical Engineering. 2020; 20(1):193-202.

ABSTRACT

The idea of designing new geometries for catalytic bed in the decomposition chamber of monopropellant thrusters is introduced with numerical simulations of pore-scale turbulent flows. The LES numerical technique is used for simulation of turbulent structures in the flow-field. The efficiency and reliability of the results obtained from numerical simulation have been determined by solving a benchmark problem of turbulent flow over the pack of cubes. The results show very good agreement with the experimental data, indicating the accuracy of the used model and numerical solution process. The characteristics of turbulent flow over two different geometries have been investigated using the numerical method. The results have been analyzed to evaluate the effectiveness of geometrical changes on the parameters associated with the catalytic reaction. All simulations have been conducted for cold flow, and the exact effects of the geometrical design of porous bed on reactive flow have not been quantified. The eddy dissipation and length scales of turbulence have been considered as the main parameters, because of their effect on rates of turbulent mixing and rate of reaction. The difference between the turbulent dissipation and length scales in the investigated flows in two different geometries indicates the effectiveness of the geometrical changes of the porous bed on the flow characteristics. Coherent structures are seen in the new geometry and the wall shear stress is reduced significantly, which increases the life of the catalytic coating.

Keywords Porous media; Monopropellant; Turbulence; Large Eddy Simulation

CITATION LINKS

[1] Propulsion options for very ... [2] Orbital mechanics for engineering ... [3] New technologies for ammonium ... [4] Packing of homogeneous ... [5] Additive manufacturing: Technology ... [6] Topological design and additive manufacturing ... [7] Numerical simulation of turbulent flow ... [8] A macroscopic turbulence model for flow in porous media suited ... [9] A new turbulence model for porous media flows. Part II: Analysis and ... [10] Large eddy simulation of turbulent flow in ... [11] Large eddy simulations of pore-scale turbulent ... [12] Lattice Boltzmann direct numerical simulation ... [13] Direct numerical simulation of turbulence over ... [14] Pore scale study on the reacting flow in porous media ... [15] Heat and mass transfer in packed ... [16] Numerical investigation of non-homogeneity and ... [17] Numerical solution of coupled flow and mass transport equations ... [18] On the structure of turbulence and a generalized eddy ... [19] Turbulent ... [20] Experimental and computational studies of mixing ... [21] Accurate estimate of turbulent dissipation rate using ... [22] Turbulence [23] The theory of homogeneous ... [24] Turbulent kinetic energy dissipation rate estimation ... [25] Effect of subgrid models on the computed interscale energy ... [26] Index of resolution quality for large eddy ... [27] LES and RANS for turbulent flow over arrays of wall ... [28] LES of flow over multiple ... [29] Assessment measures for engineering LES ... [30] Introduction to large eddy simulation of ... [31] ANSYS fluent theory ... [32] Vortex structure and heat transfer in turbulent ... [33] LES and RANS for turbulent flow over arrays ... [34] An approach to wall modeling in large-eddy ... [35] Coherent structures and ... [36] The dynamics of coherent structures in the wall ... [37] Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices ... [38] Coherent structures of turbulence: Methods of eduction and ... [39] Experimental evaluation of catalysts for monopropellant ...

¹Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

²Aerodynamic and Propulsion Department, Aerospace Research Institute of Iran, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Phone: +98(21) 82884397
Fax: +98(21) 88269296
fommi@address.ac.ir

Article History

Received: November 24, 2018

Accepted: May 4, 2019

ePublished: January 01, 2020

بررسی عددی اثرات هندسه تخلخل در طراحی بستر تجزیه پیشران‌های تک‌سوخت

دانیال ژاله MSc

گروه هوافضا، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

فتح‌الله اُنی PhD

گروه هوافضا، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

زهیر صبوحي PhD

پژوهشگاه هوافضای ایران، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

چکیده

ایده طراحی هندسی بستر متخلخل کاتالیستی برای محفظه تجزیه سوخت در پیشران‌های تک‌سوخت با به کارگیری شبیه‌سازی عددی جریان توربولنت در مقیاس حفره در این مقاله ارائه شده است. روش عددی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (ال. ای. اس.) به منظور شبیه‌سازی ساختارهای جریان توربولنت در میدان جریان به کار رفته است. کارایی و قابلیت اطمینان نتایج به دست آمده از روش شبیه‌سازی عددی با حل یک مسأله نمونه مشخص شده است. نتایج در مقایسه با داده‌های تجربی همخوانی بسیار مناسبی را نشان می‌دهند که بیانگر صحت روند حل عددی و مدل‌های استفاده شده است. ویژگی‌های جریان توربولنت در دو هندسه مختلف با روش عددی بررسی شده است. نتایج با هدف سنجش اثربخشی تغییرات هندسی بر پارامترهای مرتبط با واکنش کاتالیستی ارائه و تحلیل شده است. تمام شبیه‌سازی‌ها بدون در نظر گرفتن واکنش شیمیایی و به شکل جریان سرد انجام گرفته است و میزان دقیق اثربخشی بهبود هندسه بر ویژگی‌های جریان واکنشی در قالب مقادیر عددی ارائه نشده است. با توجه به شناخته شده بودن اثرگذاری اتلاف و مقیاس‌های طولی بر نرخ واکنش و اختلاط، این کمیت‌ها به عنوان پارامترهای اصلی مورد بررسی قرار گرفته است. تفاوت مقیاس‌های طولی و نرخ اتلاف در جریان‌های بررسی شده در دو هندسه مختلف به طور آشکار نشان‌گر اثربخشی تغییرات هندسی بستر متخلخل بر ویژگی‌های جریان است. علاوه بر ایجاد ساختارهای منظم و قابل کنترل در هندسه ارائه شده، تنش برشی روی دیواره به طور چشمگیری کاهش می‌یابد که باعث افزایش عمر لایه کاتالیستی روی سطح بستر متخلخل خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: بستر متخلخل، پیشران تک‌سوخت، جریان توربولنت، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۳

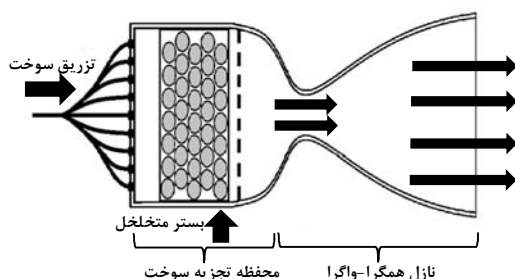
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۴

نویسنده مسئول: fommi@modares.ac.ir

شوند^[3]. رایج‌ترین نوع پیشران‌های تک‌سوخت پیشران‌های هیدرازینی هستند که اساس کار این پیشران‌ها بر مبنای تجزیه هیدرازین در یک بستر متخلخل است. گلوگاه طراحی و ساخت پیشران تک‌سوخت هیدرازین طراحی و ساخت بستر متخلخل تراستر است. تراسترهای تک‌سوخت به تدریج کارایی خود را از دست می‌دهند که به دلیل ایجاد تفجوشی میان دانه‌های کاتالیستی بستر و همچنین خوردگی پوشش کاتالیستی سطح بستر متخلخل است. در این پژوهش ایده امکان‌پذیر بودن طراحی بستر متخلخل و بهبود آن با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی ارائه شده است.

۲-۱- کارکرد پیشران تک‌سوخت هیدرازین

در شکل ۱، شماتیک یک پیشران تک‌سوخت ترسیم شده است. سوخت از محفظه با فشار ناشی از یک پمپ یا فشار گاز ذخیره‌شده در خود محفظه از طریق سوراخ‌های انژکتور روی بستر متخلخل پاشیده می‌شود. بستر متخلخل معمولاً از دانه‌های کروی شکل با روکش کاتالیستی تشکیل شده است. در تراسترهای هیدرازینی رایج، این دانه‌ها به شکل چینش اتفاقی یا چینش اتفاقی فشرده در کنار یکدیگر قرار دارند. بستر متخلخل تشکیل‌یافته از چینش دانه‌های کروی شکل، بسته به نوع چینش دارای میزان تخلخل در گستره ۳۶٪ تا ۴۸٪ خواهد بود^[4]. در محفظه تجزیه، سوخت در برخورد به سطح کاتالیستی، به چند فرآورده تجزیه می‌شود که این فرآیند تجزیه در مجموع گرماده است. گرمای حاصل از تجزیه سوخت، دمای گازهای داخل محفظه را افزایش می‌دهد. با سوخت هیدرازین خالص دمای محفظه تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. گازهای داغ داخل محفظه سپس وارد یک نازل همگرا-واگرا می‌شوند و با افزایش سرعت، نیروی پیشران تولید می‌کنند. با توجه به اهمیت کنترل نیروی پیشران و پیش‌بینی‌پذیر بودن نیروی حاصل از تزریق مشخص سوخت به پیشران تک‌سوخت در کنترل وضعیت فضاپیما، جزئیات فرآیند تجزیه هیدرازین در بستر متخلخل در این پیشران‌ها می‌تواند محل پژوهش باشد. هر اندازه که جریان یکنواخت و قابل پیش‌بینی باشد، به همان میزان نیروی تراست ناشی از یک تزریق مشخص سوخت قابل پیش‌بینی خواهد بود.



شکل ۱) نمایش شماتیک یک پیشران تک‌سوخت رایج

دانه‌های کروی شکل (معمولاً از جنس آلومینا) با پوشش فلز کاتالیست ایریدیوم یا پلاتینیوم (شکل ۱) تاکنون رایج‌ترین نوع

۱- مقدمه

ماهواره‌ها، ایستگاه‌های فضایی، موشک‌ها و به‌طور کلی تمامی ابزارهایی که پرواز در خلأ یا جو رقیق را تجربه می‌کنند به دلیل وجود نیروهای مختلف دچار انحراف از مسیر مداری یا چرخش به دور خود می‌شوند. به‌منظور افزایش عمر مفید فضاپیماها به کمک وسایل کنترل وضعیت انحراف‌های ایجادشده نسبت به مسیر هدف به‌طور دائم تصحیح می‌شود^[1, 2]. تراسترهای تک‌سوخت تاکنون رایج‌ترین ابزار کنترل وضعیت خارج از جو بوده‌اند و جایگزین عملیاتی برای این تراسترها ارائه نشده است. ایده‌های گوناگونی همچون پیشران‌های الکتریکی، مغناطیسی و پیشران گاز سرد، نتوانسته‌اند به‌طور کامل جایگزین پیشران تک‌سوخت

کاتالیستی جایگزین شوند. این چرخه را در بستر متخلخل می‌توان در قالب پدیده انتشار بررسی کرد. نرخ انتشار در بستر متخلخل، یکی از پارامترهای اصلی در طراحی بستر متخلخل است که بر نرخ واکنش شیمیایی اثر مستقیم دارد [18]. اطلاع و کنترل میزان آن می‌تواند منجر به کنترل نیروی پیشران و مصرف سوخت در پیشران تک‌سوخت شود. پدیده اختلاط در جریان سیال، در مقیاس‌های مختلف انجام می‌شود که از مقیاس مولکولی (انتشار مولکولی) تا بزرگ‌ترین مقیاس‌های جریان ادامه دارد [19]. شبیه‌سازی ساختارهای توربولنت جریان، به‌طور خاص پدیده‌های اتلاف توربولنت [19] و اختلاط [20] را با جزئیات بیشتر آشکار می‌سازد. در این پژوهش اتلاف توربولنت در بستر متخلخل به‌عنوان نشانگر میزان اختلاط در حالت جریان با فعالیت شیمیایی کاتالیستی در نظر گرفته شده است.

۳-۱- تخمین نرخ اتلاف

در معادله انرژی جنبشی میانگین‌گیری‌شده (معادله ۱) عبارت‌های سمت راست بیانگر اتلاف ناشی از نرخ کرنش میانگین و توربولنت هستند که به آن‌ها اتلاف لزج ($\bar{\epsilon}$) و اتلاف توربولنت (ϵ) گفته می‌شود.

$$\frac{D(E)}{Dt} + \nabla \cdot (\langle uE \rangle + \langle T \rangle) = -\bar{\epsilon} - \epsilon \quad (1)$$

عبارت‌های اتلاف لزج و اتلاف توربولنت به‌ترتیب در معادلات (۲) و (۳) در قالب نرخ کرنش بیان شده‌اند.

$$\bar{\epsilon} = 2\nu \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}, \quad (2)$$

$$\epsilon = 2\nu s_{ij} s_{ij}, \quad (3)$$

که در آن‌ها $\bar{S}_{ij}$ و s_{ij} به‌ترتیب نرخ‌های میانگین و نوسانی کرنش هستند (معادلات ۴ و ۵).

$$\bar{S}_{ij} = \langle S_{ij} \rangle = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$s_{ij} = S_{ij} - \langle S_{ij} \rangle = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

عبارت نخست، $\bar{\epsilon}$ بیانگر اتلاف ناشی از جریان میانگین است و به‌طور کلی در مقایسه با دیگر عبارات معادله (۱) از مرتبه Re^{-1} خواهد بود، پس در بسیاری از جریان‌های توربولنت که اساساً در اعداد رینولدز بالا رخ می‌دهند، می‌توان از آن صرف نظر کرد. عبارت دوم، ϵ بیانگر نرخ اتلاف ناشی از نوسانات توربولنت است و در جریان‌های توربولنت دارای اهمیت اساسی خواهد بود. در بیشتر روش‌های سنجش سرعت، تنها بخشی از میدان سرعت آشکارسازی می‌شود و میدان سرعت در یک لحظه به‌منظور محاسبه این کمیت‌ها در دسترس نیست. برای نمونه، در روش ال.ای.اس مؤلفه سرعت محاسبه‌شده در یک جهت خاص ترکیبی از $\langle U_i \rangle$ و بخشی از u_i خواهد بود. این که چه میزان از u_i آشکارسازی شده است، در بیشتر موارد به‌طور مستقیم قابل تخمین نیست و هدف از محاسبه نرخ اتلاف گاه تخمین همین میزان آشکارسازی سرعت نوسانی است. تخمین کرنش از معادله (۵)، کاملاً وابسته به اندازه فیلتر خواهد بود و هر اندازه فیلتر بزرگ‌تر باشد، بخش بزرگ‌تری از سرعت‌های نوسانی از این معادله حذف خواهند شد. باید در نظر

بستر متخلخل برای این نوع از پیشران‌های فضایی به شمار رفته است. دلیل انتخاب این نوع از بستر متخلخل بیش از هر چیز محدودیت ساخت بستر متخلخل با روکش کاتالیست مورد نظر است. با استفاده از روش‌های نوین ساخت افزایشی امکان ساخت بستر متخلخل با ویژگی‌های هندسی دلخواه به تازگی فراهم شده است [5] و بسترهای متخلخل از جنس تیتانیوم، به‌طور عملی در مهندسی پزشکی به‌کار می‌روند [6]. امکان طراحی هندسه محیط متخلخل، به شناخت اثرات هندسه ماده متخلخل بر جریان درون محفظه تجزیه سوخت، اهمیت کاربردی می‌دهد که پیش از این قابل تصور نبوده است. اهداف اصلی در طراحی بستر متخلخل دستیابی به پایداری جریان و واکنش و در پی آن پیش‌بینی پذیر بودن نیروی پیشران و افزایش عمر پوشش سطحی کاتالیستی است.

۲-۱- شبیه‌سازی جریان در مقیاس حفره

در مدل‌سازی عددی جریان در بستر متخلخل، دو رویکرد متفاوت مورد توجه پژوهشگران بوده است. حل معادلات حاکم بر بستر متخلخل (مدل داری) با استفاده از روش‌های حل معادلات رنس (RANS) از ابتدای به‌کارگیری روش‌های عددی مورد توجه بوده است [7-9]. در این رویکرد، اگرچه هزینه محاسباتی بسیار کمتر است، با توجه به فیزیک پیچیده توربولنس در داخل ماده متخلخل، نتایج در اعداد رینولدز بالا (جریان توربولنت در مقیاس حفره) قابل اطمینان نیست [10].

رویکرد دوم حل معادلات حاکم بر جریان لزج، با استفاده از مدل‌سازی هندسه تخلخل در مقیاس حفره است. در این رویکرد ساختارهای توربولنت جریان شبیه‌سازی می‌شوند که این شبیه‌سازی اغلب با روش ال.ای.اس (LES) انجام می‌گیرد [11, 12]. گرچه استفاده از روش‌های مبتنی بر معادلات یورنس (URANS) [9] و روش دی.ان.اس (DNS) [13] نیز مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است. شبیه‌سازی احتراق و جریان واکنشی در بستر متخلخل در مقیاس حفره، با روش یورنس [14] و بررسی جریان واکنش روی سطوح کاتالیستی در مقیاس حفره با روش شبکه بولتزمن [15, 16]، امکان دستیابی به جزئیات بسیار مفیدی از جریان واکنشی در بستر متخلخل را نشان داده است. استفاده از روش گالرکین ناپیوسته نیز رویکرد دیگری برای بررسی جریان در محیط متخلخل است [17] که در شرایط وجود شاک یا ناهمگنی کاربرد دارد.

به‌طور کلی در واکنش‌های شیمیایی، مولکول‌های واکنش‌دهنده‌ها باید با همدیگر مخلوط شوند و گرمای کافی برای آغاز واکنش نیز فراهم باشد. در واکنش‌های کاتالیستی سطحی واکنش تنها در حضور مولکول‌های ماده کاتالیست که در نزدیکی سطح کاتالیست وجود دارد انجام خواهد شد. پس از انجام واکنش در نزدیک سطح، واکنش‌دهنده‌ها با فرآورده‌های واکنش جایگزین می‌شوند. برای ادامه واکنش کاتالیستی باید فرآورده‌ها از سطح کاتالیستی دور شوند و واکنش‌دهنده‌ها با نرخ مناسبی در نزدیکی سطح

دامنه‌است، ولی اثرات اعداد موج بالا (اعداد موج فیلترشده) در این انتگرال با توجه به کاهش کارلشن در اعداد موج بالا و فواصل بزرگ می‌تواند با کاهش اندازه فیلتر به میزان قابل قبولی کاهش یابد. روش دیگر استفاده از کارلشن دوبعدی سرعت در تخمین اتلاف، محاسبه آن براساس مقیاس طول تیلور است. می‌توان نشان داد که در توربولنس ایزوتروپیک، نرخ اتلاف در رابطه (۱۰) صدق می‌کند [19].

$$\varepsilon = 15\nu \frac{u'^2}{\lambda_g^2} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، u' سرعت مجذور میانگین مربعات و λ_g مقیاس طول تیلور است. مقیاس طول تیلور به کارلشن سرعت وابسته است [19] که باعث شباهت این روش به روش تخمین ε براساس طیف انرژی خواهد شد. به‌منظور سنجش اثر تغییر هندسه بر نرخ اتلاف، در این پژوهش میزان اتلاف توربولنت بر مبنای مشتق سرعت (رابطه ۸) و طول تیلور (رابطه ۱۰) مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱- اهداف و نوآوری پژوهش

هدف اصلی این پژوهش بررسی امکان طراحی هندسه تداخل بستر کاتالیستی به‌منظور افزایش نرخ واکنش در بستر کاتالیستی و کاهش فرسایش لایه کاتالیستی سطحی است. افزایش نرخ واکنش که مرتبط با میزان انتشار توربولنت در نظر گرفته شده است، می‌تواند راندمان و حداکثر دمای محفظه تجزیه در پیشران تک‌سوخت را کنترل کند که این یک نوآوری در زمینه طراحی پیشران تک‌سوخت است. ساختار هندسی ارائه‌شده برای بستر متخلخل پیشران تک‌سوخت (چینش منظم استوانه‌ای) دیگر نوآوری این پژوهش است.

۲- معادلات حاکم و روش عددی

محاسبات عددی جریان با استفاده از نرم‌افزار FLUENT انجام شده است. جریان تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است که با توجه به عدد ماخ بسیار پایین جریان کاملاً توجیه‌پذیر است. با توجه به تمرکز شبیه‌سازی بر تخمین پارامترهای توربولنسی در جریان داخل حفره، توربولنس با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (ال.ای.اس) مدل‌سازی شده است. معادلات ناویر-استوکس تراکم‌ناپذیر لزج، به همراه معادله پیوستگی در این شبیه‌سازی به‌عنوان معادلات حاکم انتخاب شده‌اند. در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ معادلات فیلتر مکانی می‌شوند. معادله (۱۱)، معادله بقای جرم است (در شکل پایستار). $\bar{u}_i$ سرعت فیلترشده، ρ چگالی سیال و x_i مؤلفه جهت مختصات کارتزین است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (11)$$

معادله مومنتوم در هر سه جهت مختصاتی در رابطه (۱۲) بیان شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\sigma_{ij}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، σ_{ij} تنسور تنش ناشی از نیروهای لزج است که با

داشت که کوچک‌بودن اندازه سرعت‌های نوسانی فیلترشده (مقادیر زیرشبکه) بیانگر کوچک‌بودن گردان‌های سرعت زیرشبکه نیست و به این دلیل هرگز نمی‌توان اطمینان حاصل کرد که نرخ کرنش تخمینی از سرعت‌های فیلترشده دقت مناسبی از نرخ کرنش واقعی جریان را در اختیار می‌گذارد.

روش‌های مختلفی برای تخمین نرخ اتلاف از روی بخشی از سرعت آشکارشده تاکنون ارائه شده است [21]. باید در نظر داشت که بیشتر این روش‌ها با فرض‌های ساده‌کننده از معادلاتی دیگر برای نرخ اتلاف استفاده می‌کنند که بسته به میزان درستی این فرض‌های ساده‌کننده، دقت این معادلات در جریان‌های گوناگون تفاوت خواهد داشت. از شبیه‌سازی جریان به روش ال.ای.اس سرعت فیلترشده ($\bar{u}_i(t)$) به‌دست می‌آید. این کمیت شامل سرعت میانگین و بخش نامشخصی (بسته به ابعاد فیلتر و تنش زیرشبکه) از سرعت ناشی از نوسان‌های توربولنت است. استفاده از تعریف مستقیم ε [22] (معادله ۶)، یک روش رایج برای تخمین اتلاف توربولنت از نتایج آزمایشگاه و شبیه‌سازی عددی است.

$$\varepsilon = \nu \left\langle \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\rangle \quad (6)$$

در حالت سه‌بعدی، رابطه (۶) شامل تمامی مشتقات مرتبه دوم سرعت نوسانی و حاصل ضرب مشتقات مرتبه اول خواهد بود. برای توربولنس همگن، حالت ساده‌تری از تعریف اتلاف به‌دست می‌آید (معادله ۷)

$$\varepsilon = \nu \left\langle \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right\rangle = \frac{1}{2} \nu \left\langle \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right\rangle \quad (7)$$

همچنین ساده‌ترین روش برای تخمین یک‌بعدی نرخ اتلاف توربولنت، استفاده از رابطه یک‌بعدی ایزوتروپیک [22, 23] (معادله ۸) در جهت دلخواه است.

$$\varepsilon = 15\nu \left\langle \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)^2 \right\rangle = 7.5\nu \left\langle \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right)^2 \right\rangle \quad (8)$$

محاسبه نرخ اتلاف توربولنت با استفاده از این رابطه در عمل تنها به یک تخمین مشتق ساده نیاز دارد، ولی به انتخاب جهت مشتق‌گیری حساسیت نشان می‌دهد و همچنین دارای مشکل در نظرنگرفتن سرعت‌های فیلترشده و حساسیت زیاد به اندازه فیلتر است. جدا از خطای موجود در تخمین ε با استفاده از سرعت‌های فیلترشده، فرض همگن‌بودن و ایزوتروپیک‌بودن در جریان‌های کاربردی در بسیاری از مواقع برای تخمین نرخ اتلاف مناسب نیست. برای نمونه، در جریان توربولنت پشت پله، تخمین ایزوتروپیک و همگن برای نرخ اتلاف می‌تواند تا بیش از ۱۰۰ درصد اختلاف داشته باشد [24]. رویکرد دیگر برای تخمین ε ، استفاده از طیف یک‌بعدی انرژی است. رابطه میان طیف انرژی در فضای عدد موج با فرض ایزوتروپی محلی در رابطه (۹) در حالت یک‌بعدی بیان شده است.

$$\varepsilon = \frac{15}{2} \nu \left\langle \int_0^\infty \kappa_1^2 E_{22}(k_1) dk_{11} \right\rangle \quad (9)$$

که در رابطه (۹)، k_1 مؤلفه بردار عدد موج در راستای انتگرال‌گیری و E_{22} طیف یک‌بعدی انرژی است [19]. محاسبه طیف انرژی، نیازمند انتگرال‌گیری از کارلشن دوبعدی سرعت در بخش بزرگی از

و میزان قابل اطمینان بودن داده‌های به‌دست آمده خواهد بود. در شبیه‌سازی جریان در مقیاس حفره در اعداد رینولدز پایین (شروع جریان توربولنت)، استفاده از تعداد نسبتاً کمی سلول (چند میلیون) معمولاً به مستقل شدن نتایج از مدل‌سازی خواهد انجامید [10, 12, 17, 27, 28].

به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب مدل زیرشبکه در مسائل جریان در مقیاس حفره در اعداد رینولدز نسبتاً پایین، در مقایسه با بسیاری از مسئله‌های کاربردی دیگر دارای اهمیت بسیار پایینی خواهد بود. این اهمیت پایین مدل‌سازی را می‌توان با نمایش پارامتر کمی ال.ای.اس-آی.کیو (LES-IQ) نمایش داد [26]. این پارامتر به‌طور کلی بیانگر نسبت انرژی مدل‌شده به کل انرژی توربولنت جریان است. البته محاسبه کمی این پارامتر در عمل نیازمند صرف نظر از اتلاف عددی است [29]. نسبت اتلاف عددی به اتلاف توربولنت می‌تواند از صفر در روش‌های طیفی تا چند صدبرابر (برای روش تفاضل یک‌سویه) متغیر باشد [30] که به‌منظور کاهش آن در نرم‌افزار فلوئنت از روش تفاضل مرکزی محدود استفاده می‌شود؛ این روش ترکیبی از روش تفاضل مرکزی مرتبه ۲ و روش جریان‌نگر است [31].

افزودن عبارات مشتق‌گیری یک‌سویه با ضریب وزنی به تخمین تفاضل مرکزی در این روش عددی، باعث افزایش پایداری این روش و پیشگیری از نوسانات غیرفیزیکی رایج در روش‌های تفاضل مرکزی خواهد شد. الگوریتم تصحیح فشار سیمپل با توجه به حجم محاسباتی کمتر و گام زمانی بسیار کوچک در روش ال.ای.اس قابل توجه است و در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است.

در تمامی مسائل بررسی‌شده، شرایط مرزی دربرگیرنده دو نوع دیواره لزوج و شرط مرزی پریودیک است. شرط مرزی پریودیک در شبیه‌سازی به روش ال.ای.اس، مشکل شبیه‌سازی نوسانات ورودی را از میان می‌برد، ولی تنها برای مسائل دارای تقارن هندسی ارزش کاربردی دارد. در مسئله جریان داخل حفره در بستر متخلخل با تخمین بسیار مناسبی می‌توان هندسه یک حفره را با شرایط مرزی پریودیک به‌عنوان مدل میدان به‌کار برد [28, 32, 33]. مدل‌سازی دیواره لزوج در روش ال.ای.اس را به دو طریق کلی می‌توان انجام داد، مدل‌سازی و آشکارسازی [34]. در این پژوهش به‌دلیل کوچک بودن دامنه حل، جریان توربولنت در نزدیکی مرز دیواره آشکارسازی شده است. آشکارسازی جریان در نزدیکی دیواره، نیازمند استفاده از تعداد زیادی سلول در نزدیکی دیواره است، به‌طوری که نخستین سلول شبکه در محدوده $Y+ < 1$ قرار داشته باشد و تعداد قابل قبولی سلول در داخل لایه مرزی $(Y+ < 1000)$ قرار بگیرد. رسیدن به شبکه‌ای که با تعداد قابل قبول سلول این الزامات را برطرف سازد نیازمند طی کردن یک روند آزمون و خطا خواهد بود و می‌تواند هزینه زمانی و محاسباتی زیادی را تحمیل کند. با توجه به عدد رینولدز پایین جریان در مقیاس حفره، تقریباً تمام میدان حل داخل لایه مرزی قرار دارد و می‌توان با

رابطه (۱۳) تعیین می‌شود. τ_{ij} تنش مقیاس زیرشبکه است و با رابطه (۱۴) تعریف می‌شود.

$$\sigma_{ij} \equiv \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (13)$$

$$\tau_{ij} \equiv \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (14)$$

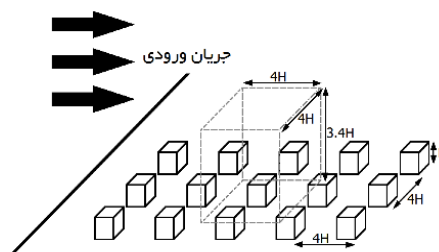
عبارت $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$ وابسته به کوچک‌ترین تغییرات سرعت در کوچک‌ترین فواصل است که در جریان توربولنت می‌تواند باعث ایجاد بزرگ‌ترین گرادین‌ها در جریان شود. اندازه این تغییرات بسیار کوچک، براساس تئوری کالماگوروف به عدد رینولدز جریان وابسته است [19]. در اعداد رینولدز متوسط و بزرگ، این پدیده‌های بسیار کوچک جریان با امکانات محاسباتی فعلی بدون شک در اعداد رینولدز بالا و جریان‌های کاربردی قابل شبیه‌سازی نیستند، زیرا کوچک‌ترین سلول‌های شبکه بسیار بزرگ‌تر از آن خواهد بود که این پدیده‌ها را آشکار کند. به این دلیل در شبیه‌سازی جریان‌های کاربردی تنش زیرشبکه می‌تواند بسیار بزرگ باشد و باید مدل‌سازی شود. در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، گردابه‌های در ابعاد هندسه و کوچک‌تر از آن تا مقیاس ابعاد سلول‌های شبکه شبیه‌سازی (آشکارسازی) می‌شوند و گردابه‌های کوچک‌تر از آن با استفاده از مدل زیرشبکه مدل‌سازی می‌شوند. مدل‌های زیرشبکه متنوعی به این منظور توسعه یافته‌اند که بیشتر آن‌ها براساس فرض بوزینسک تنش زیرشبکه را با تخمین نرخ اتلاف محاسبه می‌کنند. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، مدل زیرشبکه انرژی جنبشی دینامیک [25] مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل، جهت تخمین نرخ اتلاف زیرشبکه معادله انرژی جنبشی توربولنت را حل می‌کند. اصلی‌ترین ویژگی این مدل آن است که به هیچ پارامتر و ضریب ثابتی وابستگی ندارد (مدل کامل است). وابستگی نداشتن این مدل به ضرایب ثابت باعث حذف فرآیند انتخاب ضرایب مناسب می‌شود. همچنین حل معادله انرژی جنبشی، با فیزیک حاکم بر فرآیند تبدیل انرژی از انرژی دینامیک جریان میانگین به انرژی جنبشی توربولنت و در نهایت به انرژی درونی هماهنگی دارد و باعث رعایت بقای انرژی می‌شود. کارکرد مناسب این مدل در جریان‌های مجاور با دیواره نیز در پژوهش‌های پیشین مشخص شده است [25]. با درنظرگرفتن این نکته که در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، اساس کارکرد مدل‌های زیرشبکه، فرض کوچک بودن ابعاد آشکارشده در حد رسیدن به ایزوتروپی محلی باشد، می‌توان متوجه شد که با افزایش تراکم سلول شبکه اثرپذیری نتایج از مدل زیرشبکه کاهش خواهد یافت. در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، هر اندازه سلول‌های شبکه ریزتر شوند بخش کوچک‌تری از تنش‌ها به مدل‌سازی واگذار خواهد شد و این باعث افزایش کارایی مدل (فارغ از نحوه عملکرد مدل و فرضیات آن) خواهد شد. به این دلیل بر خلاف روش‌های مبتنی بر میانگین‌گیری رینولدز (RANS)، در روش ال.ای.اس مفهوم "استقلال از شبکه" تعریف نمی‌شود [26]، ولی بررسی اثرات تراکم شبکه بر پارامترهای اصلی مورد بررسی، نمایانگر دقت شبیه‌سازی

شبکه‌ای تقریباً یکدست به الزامات آشکارسازی لایه مرزی دست یافت.

۳- اعتبارسنجی روش حل

اعتبارسنجی نتایج حل عددی در مقیاس حفره بسیار دشوار است، زیرا در این ابعاد سنجش پارامترهای جریان نیازمند هزینه بسیار و تجهیزات دقیق است و نتایج آزمایشگاه بسیار محدودی در این زمینه موجود است. در بسیاری از پژوهش‌های عددی انجام‌شده در مبحث جریان توربولنت در مقیاس حفره، نتایج عددی بدون مقایسه با نتایج آزمایشگاه مورد استفاده و تحلیل قرار می‌گیرند [10-12]. البته باید در نظر داشت که با توجه به ابعاد کوچک شبیه‌سازی در این مسائل، دقت نتایج ال.ای.اس بسیار نزدیک به نتایج شبیه‌سازی مستقیم عددی (Direct Numerical Simulation; DNS) خواهد بود که قابلیت اطمینانی در حد نتایج حاصل از آزمایش تجربی داراست. در این پژوهش، با توجه به دیدگاه کاربردی به جریان سیال در بستر متخلخل، یک مسئله پنج‌مارک در ابعاد و عدد رینولدز مشابه، به عنوان اعتبارسنجی مدل مورد بررسی قرار گرفته است. این مسئله نخستین بار به طور تجربی مورد بررسی قرار گرفت [32] و پس از آن به طور گسترده مورد تحلیل عددی یا ویژه با روش‌های شبیه‌سازی توربولنس قرار گرفته است [28, 33]. در شکل ۲ شماتیک این مسئله ترسیم شده است. سیال با توزیع یکدست روی یک صفحه تخت که با برآمدگی‌های مکعبی دارای سطحی متخلخل است جریان می‌یابد. ورودی جریان آرام است و به تدریج با گذر از روی مکعب‌ها جریان دچار آشفتگی می‌شود. در بررسی‌های آزمایشی مشخص شده است که پس از طی مسافتی، جریان حول هر مکعب را می‌توان پریودیک در نظر گرفت [32].

در این پژوهش از دامنه و شرایط مرزی استفاده‌شده در شبیه‌سازی‌های عددی پیشین استفاده شده است و مرزهای دامنه در فاصله ۴ برابر ضلع مکعب در اطراف و ۳/۴ برابر ضلع در جهت عمود بر صفحه کف گسترش یافته است. شرایط مرزی پریودیک، شبیه‌سازی را بی‌نیاز از شرایط مرزی در ورودی (شبیه‌سازی توربولنس ورودی) می‌سازد.



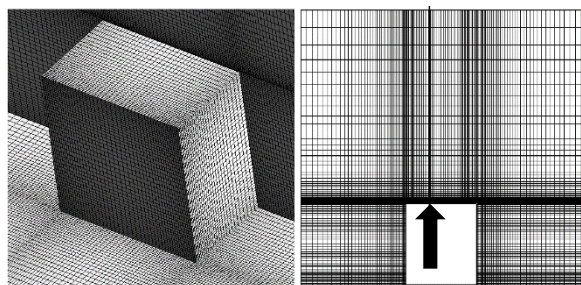
شکل ۲) شماتیک هندسه پنج‌مارک مورد بررسی و میدان حل

شبکه استفاده‌شده در این شبیه‌سازی از سلول‌های شش‌وجه سازمان‌یافته تشکیل شده است. ساختار شبکه در شکل ۳ نمایش داده شده است. سلول‌ها در نزدیکی سطوح مکعب به منظور افزایش دقت محاسبات در زیرلایه لزوج لایه مرزی متراکم شده‌اند. $Y+$ در

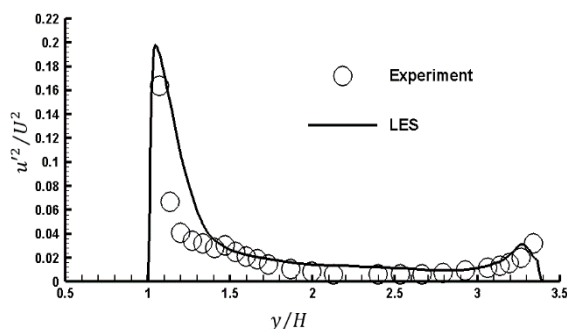
تمامی سطوح کمتر از ۱ است. اثرگذاری نقاط شبکه روی حل، با استفاده از سه شبکه دارای ۴۵۹/۰ میلیون سلول، ۲/۱۲۵ میلیون سلول و ۸/۷۰۴ میلیون سلول بررسی شده است. اگرچه نتایج به‌دست‌آمده در شبکه دارای ۸/۷۰۴ میلیون سلول دارای اطلاعات بیشتری از نوسانات فرکانس بالای جریان است، ولی این جزئیات اثری بر پارامترهای اصلی جریان، از جمله تنش رینولدز میانگین و نرخ اتلاف میانگین نمی‌گذارد.

لازم به ذکر است که مفهوم استقلال حل از شبکه برای شبیه‌سازی توربولنس جریان با روش ال.ای.اس معنای مشخصی ندارد و هر اندازه شبکه متراکم‌تر شود، مقیاس‌های کوچک‌تری از جریان آشکار می‌شود. در این پژوهش به منظور مشاهده کیفیت شبیه‌سازی به روش ال.ای.اس، اثر تراکم شبکه بر پارامتر تولید انرژی جنبشی توربولنت و اتلاف توربولنت بررسی شده است. عدد رینولدز مطابق با نتایج آزمایشگاه ۱۳۰۰۰ در نظر گرفته شده است که در ابعاد مورد بررسی سرعت جریان معادل ۳/۸۴ متر بر ثانیه خواهد بود.

به منظور صحت‌سنجی نتایج، بهترین پارامتر ارائه‌شده در نتایج آزمایشگاهی، تنش رینولدز در خطوط عمودی در صفحه تقارن است. در شکل ۳، خط مورد بررسی مشخص شده است و در نمودار ۱، تنش رینولدز بدون بعد استخراج‌شده از حل بر شبکه دارای ۲/۱۲۵ میلیون سلول در مقایسه با نتایج آزمایشگاه ترسیم شده است. با توجه به ماهیت کمیت تنش رینولدز، می‌توان گفت همخوانی مناسبی میان نتایج عددی و نتایج آزمایشگاه وجود دارد.

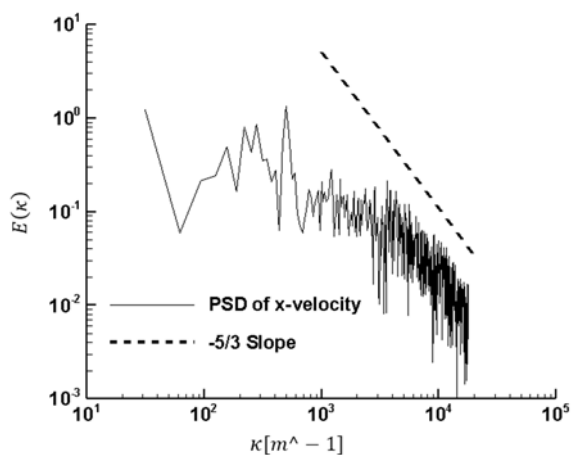


شکل ۳) شبکه‌بندی منظم روی مکعب و برش صفحه تقارن (محل استخراج تنش رینولدز در سمت راست با علامت اشاره مشخص شده است).



نمودار ۱) مقایسه تنش رینولدز میانگین زمانی در یک خط عمودی در نتایج حل ال.ای.اس با نتایج آزمایشگاهی

است. به دلیل گسسته بودن میدان حل عددی و عدم استفاده از فیلتر صریح، بخش انتهایی طیف با فیلتر برش از میان رفته است. مقادیر اتلاف توربولنت و مقیاس‌های طول در جدول ۱ ارائه شده است. این اطلاعات روی خطوط موازی کانال در راستای جریان در هندسه چینش استوانه‌ای و روی دایره‌های هم‌مرکز در هندسه کره استخراج شده است. مشاهده می‌شود که مقیاس طول تیلور و مقیاس طول انتگرالی در دو هندسه به‌طور محسوسی متفاوت هستند.



نمودار ۲) طیف چگالی توانی سرعت در جهت x

جدول ۱) اتلاف و طول مشخصه به‌دست‌آمده از بررسی دو هندسه تخلخل

پارامتر مورد بررسی	شبکه استوانه مربعی	چینش منظم کره
مقیاس طول انتگرالی (m)	۰/۰۰۱۰۵	۰/۰۰۱۳۷۵
مقیاس طول تیلور (m)	۰/۰۰۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰۷۳
شدت توربولنس	۲/۵۳	۵/۴۲
اتلاف از طول تیلور (m^2s^{-3})	۷/۰۱	۸/۲۹
اتلاف از مشتقات سرعت (m^2s^{-3})	۳/۳	۵/۸

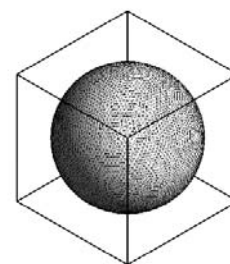
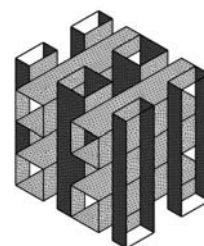
در هندسه چینش منظم کره، جریان به دلیل اجبار بر گذر از فضای میان کره‌ها، نمی‌تواند در خط مستقیم حرکت کند و تغییر جهت دائم بردار سرعت در این محیط باعث افزایش شدت توربولنس در فضای اطراف کره می‌شود. ساختارهای توربولنس در این محیط بسیار نامنظم هستند. در شکل ۵، با استفاده از صفحات دارای رتیسیت لایه‌ای ثابت، این ساختارها آشکارسازی شده است. در جریان اطراف کره هیچ ساختار پایداری وجود ندارد. در هندسه چینش استوانه‌ای جریان می‌تواند به راحتی در میان کانال‌های موازی حرکت کند و در گذر از حفره‌های اطراف کانال، نوسانات توربولنت به وجود خواهد آمد. نکته قابل توجه در این ساختارهای جریانی، ایجاد ساختارهای منسجم [19, 35, 36] است. این ساختارها در شکل ۶ با استفاده از سطوح دارای قدرت چرخش محوری ثابت [37] در یک نقطه زمانی ترسیم شده‌اند. این ساختارها در بخش کم سرعت محل تقاطع استوانه‌های مربعی قرار دارند و

۴- نتایج شبیه‌سازی عددی

با توجه به همخوانی نتایج آزمایشگاه با نتایج عددی می‌توان مدل ال.ای.اس را برای شبیه‌سازی جریان در مقیاس حفره در اعداد رینولدز محدوده مورد نظر معتبر دانست. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده براساس این اعتبارسنجی، تراکم شبکه و دیگر تنظیمات و شرایط مرزی مشابه مورد استفاده قرار گرفته است.

در شکل ۴، هندسه‌های در نظر گرفته‌شده برای سلول واحد حفره با ارائه شبکه‌بندی روی دیواره‌ها ارائه شده است. در سمت چپ، سلول واحد چینش منظم کره‌ها که می‌تواند با تخمین خوبی بیانگر جریان در انواع چینش کره‌ها باشد [4]، ارائه شده است. در پیشران‌های تک‌سوخت، هندسه رایج تاکنون استفاده از کره‌های کاتالیستی بوده است که در این پژوهش هندسه پیشنهادی، هندسه تشکیل‌شده از چینش منظم استوانه‌های مربعی متعامد است که در سمت راست شکل ۴ یک واحد تکرار آن ارائه شده است.

از آنجا که هندسه کره امکان تشکیل شبکه‌بندی مکعبی منظم را فراهم نمی‌آورد، هر دو هندسه با استفاده از شبکه‌های نامنظم با سلول‌های هرمی، با تراکم به‌دست‌آمده در کالیبراسیون حل (مسئله ارائه‌شده در بخش ۲) گسسته‌سازی شده‌اند. طول مشخصه کره برابر با شعاع آن و طول مشخصه چینش استوانه‌ای برابر با ضلع مقطع استوانه‌ها در نظر گرفته شده است.



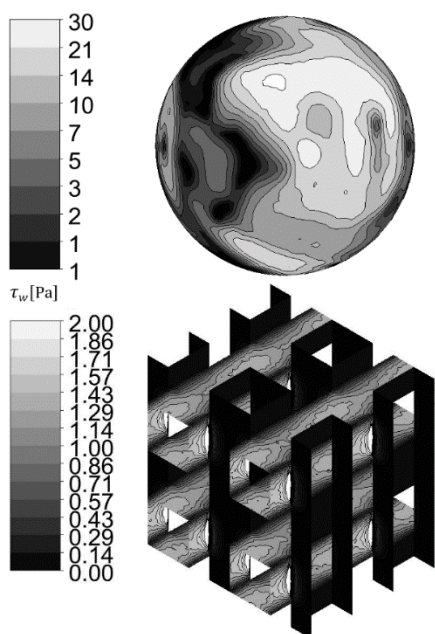
شکل ۴) شبکه‌بندی روی دیواره و نمایش میدان حل، سمت چپ یک واحد تکرار از چینش منظم کره‌ها، سمت راست یک تکرار از چینش منظم استوانه مربعی

جریان با عدد رینولدز ۲۰۰۰، با شرایط مرزی پریودیک در واحد تکرار هر دو شکل، شبیه‌سازی شده است. استخراج منحنی طیف انرژی براساس عدد موج، نشان‌دهنده آشکارسازی بخشی از زیرگستره اینرسیال در طیف توربولنت است. مطابق با تئوری کالماگوروف، نمودار لگاریتمی طیف انرژی در زیرگستره اینرسیال باید با شیب $\frac{5}{3}$ روند کاهشی داشته باشد که در نمودار ۲ این شیب مشخص شده

شباهت این ساختارها در تمامی کنج‌ها نشانگر پایداری این گردابه‌ها است.



شکل ۵) ساختارهای گردابه‌ای تشکیل شده در محیط متخلخل با ساختار چینش منظم کروی (تکرار گرافیکی یک حفره)

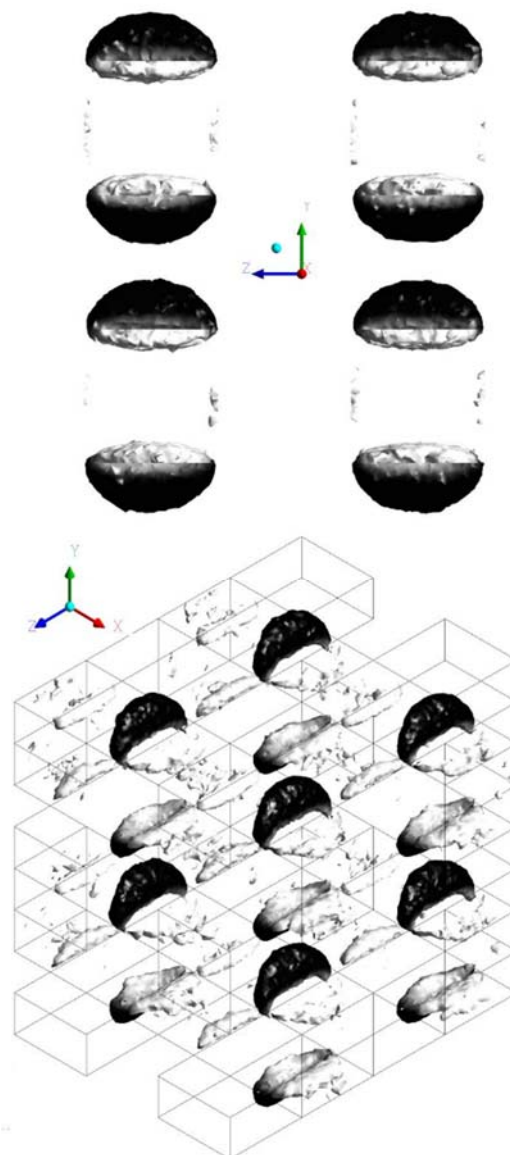


شکل ۷) شماتیک هندسه بنچ‌مارک مورد بررسی و میدان حل

در جدول ۲ مقادیر میانگین و ماکزیمم تنش برشی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که تنش برشی میانگین در حدود ۱۳ برابر و تنش برشی ماکزیمم در حدود ۱۰ برابر در هندسه چینش استوانه‌ای دچار کاهش می‌شود. این کاهش در تنش برشی باعث افزایش طول عمر پوشش کاتالیستی خواهد شد. همچنین نیروی جانبی وارد بر سازه کاهش می‌یابد.

جدول ۲) تنش برشی میانگین و ماکزیمم روی سطوح دیواره

پارامتر مورد بررسی	شبکه استوانه مربعی	چینش منظم کره
میانگین تنش برشی دیواره (Pa)	۰/۶۱۵	۷/۸۹
ماکزیمم تنش برشی دیواره (Pa)	۴/۳۱	۳۸/۱



شکل ۶) ساختارهای گردابه‌ای منسجم تشکیل شده در محیط متخلخل شبکه‌ای (بالا) و محل قرارگیری این ساختارها (پایین). جریان اصلی در جهت x است.

تعارض منافع: نتایج ارائه‌شده در این مقاله فاقد هرگونه تعارض منافع است.

سهم نویسندگان: دانیال ژاله (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ فتح‌الله امی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۳۰٪)؛ زهیر صبوحي (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪)

منابع مالی: این پژوهش با استفاده از منابع مالی شخصی نویسندگان انجام شده است.

۵- فهرست علائم

P	فشار (Pa)
E	انرژی جنبشی واحد جرم (m^2s^{-2})
u	بردار سرعت نوسانی (ms^{-1})
U_i	مؤلفه بردار سرعت (ms^{-1})
$\bar{u}_i$	مؤلفه سرعت فیلترشده (ms^{-1})
u'	مؤلفه سرعت زیرشبکه (ms^{-1})
T	بردار شار انرژی (s^{-3})
u_j	سرعت نوسانی (ms^{-1})
$\bar{S}_{ij}$	نرخ کرنش فیلترشده (s^{-1})
s_{ij}	نرخ کرنش زیرشبکه (s^{-1})
$Y +$	فاصله بی‌بعد از دیواره
علائم یونانی	
ε	اتلاف توربولنت (m^2s^{-3})
$\bar{\varepsilon}$	اتلاف لزج (m^2s^{-3})
ρ	چگالی (kgm^{-3})
τ	تنش برشی (Pa)
λ_g	مقیاس طول تیلور (m)
σ_{ij}	تنسور تنش لزج (Pa)
τ_{ij}	تنسور تنش زیرشبکه (Pa)
δ_{ij}	تابع دلتای کروئکر
بالانویس‌ها	
SGS	مقیاس زیرشبکه

منابع

- 1- Leomanni M, Garulli A, Giannitrapani A, Scortecchi F. Propulsion options for very low Earth orbit microsattellites. *Acta Astronautica*. 2017;133:444-454.
- 2- Curtis HD. *Orbital mechanics for engineering students*. 3rd Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2013.
- 3- Negri M, Wilhelm M, Hendrich C, Wingborg N, Gediminas L, Adelöw L, et al. New technologies for ammonium dinitramide based monopropellant thrusters-The project RHEFORM. *Acta Astronautica*. 2018;143:105-117.
- 4- Smith WO, Foote PD, Busang PF. Packing of homogeneous spheres. *Physical Review*. 1929;34(9):1271.
- 5- Guo N, Leu MC. Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2013;8(3):215-243.
- 6- Wang X, Xu Sh, Zhou Sh, Xu W, Leary M, Choong P, et al. Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review. *Biomaterials*. 2016;83:127-141.
- 7- Nimvari ME, Maerefat M, El-Hossaini MK. Numerical simulation of turbulent flow and heat transfer in a

در این پژوهش، ایده جایگزین کردن بستر متخلخل کاتالیستی در پيشران تک‌سوخت هیدرازین، بر مبنای شبیه‌سازی عددی جریان بدون در نظر گرفتن واکنش ارائه شد. یک هندسه پیشنهادی بر مبنای چینش استوانه‌های مربعی، معرفی و با هندسه رایج که از دانه‌های کروی کاتالیستی تشکیل شده است، مقایسه شد. روش عددی با استفاده از تکنیک ال.ای.اس بر یک مسئله مشابه کالیبره و در مقایسه با نتایج آزمایشگاه اعتبارسنجی شد.

بررسی عددی جریان در بستر متخلخل، با هدف سنجش تغییرات در پارامترهای اتلاف توربولنت و تنش برشی سطحی انجام گرفت. بررسی گستره طیف توربولنس در نتایج به‌دست‌آمده از حل ال.ای.اس در هندسه‌های مورد بررسی، نشان‌دهنده آشکارسازی بخشی از زیرگستره اینرسیال است که کیفیت قابل قبول شبیه‌سازی را در مدل‌سازی تنش‌های زیرشبکه نشان می‌دهد.

هندسه پیشنهادی (چینش منظم استوانه‌ای) دارای نرخ اتلافی کمتر از هندسه رایج (چینش کره‌ای) است، ولی می‌توان نرخ اتلاف را در این دو هندسه هم‌مرتبه دانست. ساختارهای توربولنت در چینش کره‌ای، بسیار نامنظم و ناپایدار است و تحلیل ساختارها هیچ نوع ساختار منسجمی را در این محیط نشان نمی‌دهد. در مقابل، چینش منظم استوانه‌ای، ساختارهای منظمی را در محل تقاطع کانال‌ها ایجاد می‌کند که امکان کنترل پایداری جریان را در محیطی با این هندسه به‌وجود می‌آورد.

بررسی تنش برشی روی دیواره‌های بستر کاتالیستی در هر دو هندسه، نشان‌دهنده کاهش چشمگیر تنش برشی دیواره در هندسه چینش منظم استوانه‌ای در مقایسه با کره‌های منظم است. آسیب‌دیدگی بستر متخلخل پارامتر بسیار مهمی در طراحی تراسترهای تک‌سوخت به شمار می‌رود. کاهش تنش برشی روی دیواره، باعث افزایش عمر پوشش کاتالیستی این تراسترها خواهد شد. همچنین هندسه پیشنهادی از پدیده تفجوشی سطوح کاتالیستی که در تراسترهای دارای بستر چینش کره‌ای اتفاق می‌افتد جلوگیری خواهد کرد، زیرا سطوح کاتالیستی در این هندسه با یکدیگر امکان برخورد ندارند.

این بررسی‌ها در میزان تخلخل برابر انجام شده است و هندسه پیشنهادی می‌تواند با تغییر در میزان تخلخل، تغییرات قابل ملاحظه در پارامترهای جریان ایجاد کند. همچنین به‌دلیل دارا بودن سطوح صاف، ایجاد پوشش کاتالیستی در این هندسه می‌تواند امکان استفاده از روش‌های ساخت متنوعی را فراهم آورد. بررسی اثرگذاری پارامترهای هندسی در چینش منظم استوانه‌ای بر مشخصات جریان و شبیه‌سازی جریان با واکنش کاتالیستی می‌تواند زمینه پژوهش‌های دیگری باشد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان موردی بیان نکردند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان اصالت محتوی و متن این مقاله و همخوانی نتایج ارائه‌شده با داده‌های به‌دست‌آمده را تأیید می‌کنند.

- 22- Hinze JO. Turbulence. 2nd Edition. New York: McGraw-Hill; 1975.
- 23- Batchelor Gk. The theory of homogeneous turbulence. Cambridge: Cambridge University Press; 1953. pp. 18-66.
- 24- Saarenrinne P, Piirto M. Turbulent kinetic energy dissipation rate estimation from PIV velocity vector fields. *Experiments in Fluids*. 2000;29(1):S300-S307.
- 25- Menon S, Yeung PK, Kim WW. Effect of subgrid models on the computed interscale energy transfer in isotropic turbulence. *Computers & Fluids*. 1996;25(2):165-180.
- 26- Celik IB, Cehreli ZN, Yavuz I. Index of resolution quality for large eddy simulations. *Journal of Fluids Engineering*. 2005;127(5):949-958.
- 27- Xie ZT, Castro IP. LES and RANS for turbulent flow over arrays of wall-mounted obstacles. *Flow Turbulence and Combustion*. 2006;76(3):291-312.
- 28- Stoesser T, Mathey F, Fröhlich J, Rodi W. LES of flow over multiple cubes. *ERCOTAC Bulletin*. 2003;56:15-19.
- 29- Celik I, Klein M, Janicka J. Assessment measures for engineering LES applications. *Journal of Fluids Engineering*. 2009;131(3):031102.
- 30- Fröhlich J, Rodi W. Introduction to large eddy simulation of turbulent flows. In: Launder B, Sandham N. Closure strategies for turbulent and transitional flows. Cambridge: Cambridge University Press; 2002.
- 31- ANSYS. ANSYS fluent theory guide. Canonsburg: ANSYS; 2013.
- 32- Meinders ER, Hanjalić K. Vortex structure and heat transfer in turbulent flow over a wall-mounted matrix of cubes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1999;20(3):255-267.
- 33- Xie Z, Castro IP. LES and RANS for turbulent flow over arrays of wall-mounted obstacles. *Flow, Turbulence and Combustion*. 2006;76(3):291-312.
- 34- Nikitin NV, Nicoud F, Wasistho B, Squires KD, Spalart PR. An approach to wall modeling in large-eddy simulations. *Physics of Fluids*. 2000;12(7):1629-1632.
- 35- Hussain AK. Coherent structures and turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 1986;173:303-356.
- 36- Aubry N, Holmes P, Lumley JL, Stone E. The dynamics of coherent structures in the wall region of a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*. 1988;192:115-173.
- 37- Zhou J, Adrian RJ, Balachandar S, Kendall TM. Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 1999;387:353-396.
- 38- Alfonsi G. Coherent structures of turbulence: Methods of eduction and results. *Applied Mechanics Reviews*. 2006;59(6):307-323.
- 39- Greer H, King SM, Marx PC, Taylor D. Experimental evaluation of catalysts for monopropellant hydrazine propulsion. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1971;8(2):105-110.
- channel partially filled with a porous media. *International Journal of Thermal Sciences*. 2012;60:131-141.
- 8- Chandesris M, Serre G, Sagaut P. A macroscopic turbulence model for flow in porous media suited for channel, pipe and rod bundle flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006;49(15-16):2739-2750.
- 9- Teruel FE. A new turbulence model for porous media flows. Part II: Analysis and validation using microscopic simulations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009;52(21-22):5193-5203.
- 10- Kuwahara F, Yamane T, Nakayama A. Large eddy simulation of turbulent flow in porous media. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2006;33(4):411-418.
- 11- Kuwata Y, Suga K. Large eddy simulations of pore-scale turbulent flows in porous media by the lattice Boltzmann method. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2015;55:143-157.
- 12- Kuwata Y, Suga K. Lattice Boltzmann direct numerical simulation of interface turbulence over porous and rough walls. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2016;61(Part A):145-157.
- 13- Kuwata Y, Suga K. Direct numerical simulation of turbulence over anisotropic porous media. *Journal of Fluid Mechanics*. 2017;831:41-71.
- 14- Fallah Jouybary N, Maerefat M, Nimvari ME. Pore scale study on the reacting flow in porous media including flow turbulence. *Modares Mechanical Engineering*. 2013;13(10):140-151. [Persian]
- 15- Plautz DA, Johnstone HF. Heat and mass transfer in packed beds. *AIChE Journal*. 1955;1(2):193-199.
- 16- Taeibi Rahni M, Sheida M, Esfahanian V. Numerical investigation of non-homogeneity and specific area in porous media on packed bed reactor performance by Lattice Boltzmann Method. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;17(12):446-456. [Persian]
- 17- Raeisi A, Ghafouri HR, Rostamy D. Numerical solution of coupled flow and mass transport equations in porous medium using discontinuous Galerkin method. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(11):397-408. [Persian]
- 18- Magnussen B. On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow. 19th Aerospace Sciences Meeting, 1981 January 12-15, St. Louis, Missouri. Reston: AIAA; 1981.
- 19- Pope SB. Turbulent flows. New York: Cambridge University Press; 2001. pp. 30-333.
- 20- Jana SC, Metcalfe G, Ottino JM. Experimental and computational studies of mixing in complex Stokes flows: The vortex mixing flow and multicellular cavity flows. *Journal of Fluid Mechanics*. 1994;269:199-246.
- 21- Xu D, Chen J. Accurate estimate of turbulent dissipation rate using PIV data. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2013;44:662-672.