

شبیه سازی عددی سیکلون جریان محوری برای کاربرد جرقه گیری سامانه های آگروز دیزل

علی رضائی^۱، محمدجواد مغربی^۲، هاشم احمدی تیغ چی^۳، علی فائزین^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، alirezaei1999@um.ac.ir

^۲ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، mjmaghrebi@um.ac.ir

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، hashemahmadi@um.ac.ir

^۴ دانشیار، گروه طراحی ماشین آلات صنایع غذایی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، a.faezian@rifst.ac.ir

چکیده

آتش سوزی های خطرناک جلوگیری می کند. در طول دهه های گذشته، تحقیقات زیادی در زمینه شبیه سازی سیکلون ها انجام شده است که با پیشرفت های قابل توجه در عملکرد سخت افزار کامپیوترها، روش های عددی به ابزاری قدرتمند و اقتصادی برای بررسی رفتار جریان های چرخشی و پیچیده در جداکننده های سیکلونی تبدیل شده است.

دیزوباک^۱ و همکاران [۱] به بررسی سیکلون جریان محوری برای فیلتر هوای ورودی موتور احتراق داخلی پرداختند. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار آنسیس فلونت^۲، اثر طول ناحیه جدایش و قطر ورودی لوله خروجی در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه بررسی شد. مشخص شد که افزایش طول ناحیه جدایش و کاهش قطر ورودی باعث بهبود راندمان جداسازی ذرات می شود. باباوغلو^۳ و همکاران [۲] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی اثر سرعت ورودی و پارامترهای هندسی بر الگوی جریان، افت فشار و راندمان جداسازی سیکلون را بررسی کردند. آنها از مدل تنش های رینولدز برای شبیه سازی جریان و مدل فاز گسسته برای ردیابی ذرات استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش عدد رینولدز ورودی، توزیع سرعت و فشار تغییر نمی یابد ولی دامنه بزرگی آنها تحت تاثیر قرار می گیرد.

لیو^۴ و همکاران [۳] با شبیه سازی عددی، عملکرد یک سیکلون محوری برای جداسازی ذرات مایع از گاز را بررسی کردند. آنها از مدل آشفستگی $K-\varepsilon RNG$ و مدل فاز پراکنده استفاده کردند و اثرات برخورد، ادغام و شکست قطرات نادیده گرفته شد. نتایج نشان داد که با افزایش قطر ذرات، راندمان جداسازی افزایش و افت فشار نیز افزایش و سپس به آرامی کاهش می یابد. یانکین مائو^۵ و همکاران [۴] با انجام شبیه سازی عددی، جریان دوفازی گاز-جامد در یک سیکلون جریان محوری را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، از مدل آشفستگی $K-\varepsilon RNG$ و مدل فاز پراکنده DPM با کوپلینگ

جرقه هایی که از موتورهای دیزلی تولید می شوند، هنگام خروج از آگروز در صورت تماس با مواد قابل اشتعال می توانند منجر به آتش سوزی و انفجار شوند. این جرقه ها به دلیل واکنش ناقص سوخت ایجاد می شوند و برای به دام انداختن آنها از تجهیزاتی به نام جرقه گیر استفاده می شود که یکی از انواع رایج آنها، سیکلون جریان محوری است. در این پژوهش، شبیه سازی عددی جریان در سیکلون محوری با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و نرم افزار فلونت انجام شده است و عملکرد جداسازی ذرات و افت فشار برای سه دبی جریان مختلف با قطر ذرات ۱۰۰ میکرومتر بررسی شد. نتایج نشان داد که راندمان جداسازی ذرات برای سه دبی حجمی ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۴۵ متر مکعب به ترتیب برابر با ۹۲، ۹۳ و ۹۵ می باشد. همچنین، تأثیر زاویه دوران پره بر افت فشار، به عنوان پارامتری مهم در عملکرد موتور دیزل، نیز مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش دبی ورودی به سیکلون، افت فشار افزایش چشمگیری دارد. درحالی که کاهش زاویه دوران پره ها باعث کاهش افت فشار می شود، به طوری که با کاهش زاویه دوران از ۱۳۸ درجه به ۹۰ درجه افت فشار ۶۷٪ کاهش پیدا می کند.

واژه های کلیدی

جرقه گیر، سیکلون جریان محوری، راندمان جداسازی، افت فشار

۱- مقدمه

سیکلون های جریان محوری یکی از تجهیزات پرکاربرد و مؤثر برای جداسازی ذرات از گاز یا مایع هستند. این جداکننده های محوری از دو جزء اصلی تشکیل شده اند: بدنه داخلی مخروطی شکل و پره های ثابت که چرخش لازم جریان را فراهم می کنند. تحت نیروی گریز از مرکز ناشی از این چرخش، ذرات جامد به سمت دیواره پرتاب شده و با برخورد به دیوار تله، جمع آوری و از سیال حامل (گاز) جدا می شوند. یکی از کاربردهای صنعتی سیکلون ها، جداسازی ذرات داغ و جرقه های تولیدی از موتور دیزل می باشد که از انفجار و

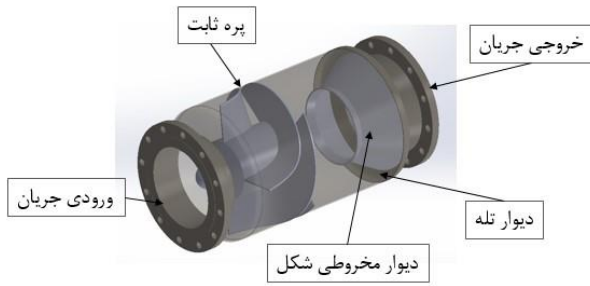
¹ Tadeusz Dziubak

² ANSYS Fluent

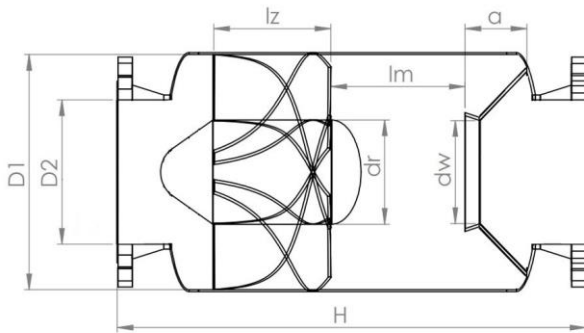
³ Nihan Uygun Babaoglu

⁵ Liu

⁶ Mao



شکل ۱: معرفی اجزای سیکلون محوری



شکل ۲: پارامترهای هندسی سیکلون جریان محوری

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات فاز پیوسته و پراکنده می‌باشد. برای مدل‌سازی جریان مغشوش فاز پیوسته دو معادله اصلی پیوستگی و حرکت میانگین‌گیری شده به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \vec{u}_i \vec{u}_j) =$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho \vec{g}_i$$

با صرف نظر از اثر ذرات بر سیال معادله فاز پراکنده به صورت زیر است [۸]:

$$\frac{du_{pi}}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{24} (u_i - u_{pi}) + \frac{g_i (\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (3)$$

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = u_{pi} \quad (4)$$

که ρ ، μ ، ρ_p و d_p به ترتیب چگالی، ویسکوزیته سیال و چگالی، قطر ذرات و تنش‌های رینولدز می‌باشد. C_D ضریب

دوطرفه بین فاز پیوسته (هوا) و فاز گسسته (ذرات) استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان داد که با افزایش قطر ریشه پره، افت فشار ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش زاویه خروجی پره‌ها از ۲۵ به ۴۰ درجه نسبت به افق، موجب کاهش افت فشار می‌شود.

بوس^۶ و همکاران [۵] یک رویکرد تحلیلی بهبود یافته برای کنترل انتشار ذرات دوده دیزل با استفاده از جداکننده سیکلون ارائه دادند. نتایج نشان داد که کاهش قطر سیکلون باعث افزایش نیروی گریز از مرکز و بهبود راندمان جمع‌آوری می‌شود، اما افت فشار سیکلون افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش دبی جریان اگزوز موجب جداسازی بهتر ذرات ریز و کاهش قطر برش ذره می‌شود. محمد عامر^۷ و همکاران [۶] یک طرح بهینه شده جرقه‌گیر^۸ معرفی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل جدید برای ذرات بزرگتر (۰/۵ میلی‌متر) عملکرد بهتری از مدل تجاری موجود دارد، در حالی که برای ذرات کوچکتر (۰/۲ میلی‌متر) مدل تجاری کارایی بیشتری دارد. هدف این پژوهش، بررسی توزیع سرعت، افت فشار در دبی حجمی‌های مختلف و بررسی راندمان جداسازی ذرات برای تجهیز صنعتی جرقه‌گیر می‌باشد که در خروجی سامانه‌های اگزوز دیزل قرار می‌گیرد. برای این منظور از شبیه‌سازی عددی به روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم استفاده می‌شود و نتایج خروجی با تغییر پارامترهای تاثیرگذار مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۲- تعریف مسئله و معرفی هندسه

عملکرد سیکلون جریان محوری به این صورت است که پس از ورود سیال به تجهیز، جریان در اثر برخورد با پره‌های ثابت راهنما حرکت چرخشی پیدا می‌کند و موجب می‌شود که ذرات تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز به سمت دیواره‌ها حرکت کنند. سپس ذرات به دیوار تله برخورد کرده و در اثر نیروی ثقل به قسمت پایین سیکلون منتقل و جداسازی ذرات صورت می‌گیرد. مشخصات هندسی نسبت به قطر بدنه سیکلون در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی سیکلون نسبت به قطر بدنه

تعریف متغیر	متغیر	مقدار پیش فرض
طول کلی سیکلون	H/D1	2
قطر بدنه	D1/D1	1
قطر ورودی	D2/D1	0.61
قطر ریشه پره به قطر بدنه	dr/D1	0.44
قطر داخلی لوله خروجی به قطر بدنه	dw/D1	0.52
طول جدایش به قطر بدنه	lm/D1	0.5
ارتفاع پره به قطر بدنه	lz/D1	0.5
طول محفظه جدایش به قطر بدنه	a/D1	0.34

⁶ Bose

⁷ Ammar

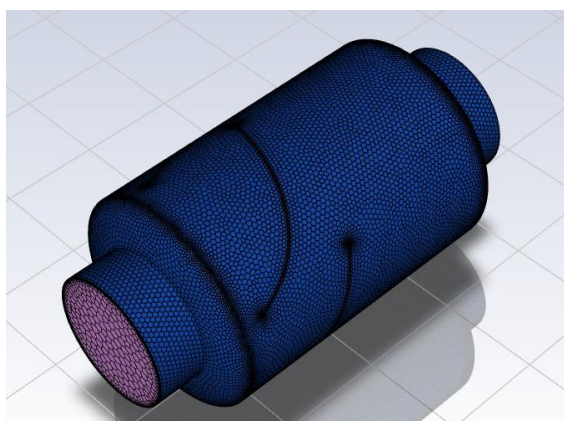
⁸ Spark Arrester

۵- استقلال نتایج از شبکه محاسباتی

برای تولید شبکه محاسباتی از نرم افزار فلوئنت مشینگ استفاده شده است و شبکه تولیدی از نوع Polyhedral می باشد. نتایج استقلال از شبکه برای سیکلون مورد مطالعه در دبی حجمی ۰/۴۵ متر مکعب برثانیه در جدول ۳ گزارش شده است. این جدول نشان می دهد که تفاوت بین نتایج شبکه های متوسط و ریز تنها ۰/۸۸ درصد است که قابل اغماض می باشد. بنابراین برای شبیه سازی های بعدی از شبکه متوسط ۱۲۰۰۰۰ سلول استفاده خواهد شد.

جدول ۳: نتایج افت فشار در تعداد شبکه های مختلف

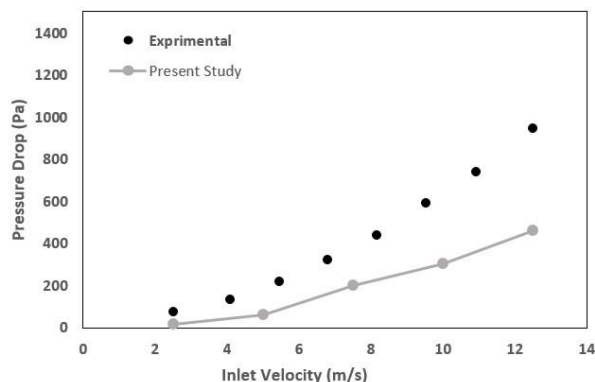
تعداد مش	افت فشار (pa)	درصد اختلاف (%)
درشت: ۷۰۰۰۰۰	۶۴۳/۵	۲/۲
متوسط: ۹۰۰۰۰۰	۶۵۸/۳	۰/۸۸
ریز: ۱۱۲۰۰۰۰	۶۶۴/۲	-



شکل ۳: شبکه محاسباتی تولیدی در نرم افزار فلوئنت مشینگ

۶- اعتبار سنجی

برای بررسی صحت تنظیمات نرم افزاری و اعتبار نتایج، افت فشار در سیکلون با داده های آزمایشگاهی دیزوباک و همکاران [۱] مقایسه شده است. روند تغییرات داده های حاصل از حل عددی و داده های تجربی با یکدیگر تطابق خوبی دارد و حل عددی می تواند رفتار واقعی جریان سیال را به خوبی توصیف کند.



شکل ۴: مقایسه افت فشار شبیه سازی عددی و کار آزمایشگاهی دیزوباک

درگ ذرات و u_i , u_{pi} , g_i به ترتیب سرعت جریان سیال، سرعت ذرات و شتاب گرانش (در جهت i) می باشند و عدد رینولدز ذرات به صورت زیر تعریف می شود:

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (5)$$

ضریب درگ C_D بستگی به قطر ذرات و عدد رینولدز دارد و با استفاده از رابطه مورسی و الکساندر به صورت زیر بیان می شود [۷]:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (6)$$

a_1 , a_2 و a_3 مقادیر ثابت و Re عدد رینولدز می باشند.

۴- شبیه سازی عددی و شرایط مرزی

در این پژوهش با توجه به عدد ماخ پایین ($Ma < 0.3$) معادلات ناویر-استوکس در حالت تراکم ناپذیر و پایا با روش حجم محدود گسسته سازی شده و کوپلینگ فشار و سرعت با الگوریتم Couple انجام شده است، شبیه سازی عددی در نرم افزار انسیس فلوئنت و با استفاده از مدل آشفتگی تنش های رینولدز^۹ صورت گرفته است. این مدل، تنش های برشی را مستقیماً از معادلات انتقال محاسبه کرده و برای جریان های چرخشی شدید و غیرهمگن مانند سیکلون مناسب است [۷]. برای گسسته سازی معادلات مومنتم، انرژی جنبشی اغتشاشی و اضمحلال انرژی جنبشی از طرح بالادست مرتبه دوم^{۱۰}، برای تنش های رینولدز از طرح بالادست مرتبه اول و برای فشار از طرح پله ای فشار^{۱۱} استفاده شده است. برای ورودی و خروجی سیکلون به ترتیب از شرط مرزی سرعت ورودی^{۱۲} و فشار خروجی^{۱۳} و برای دیوارها شرط عدم لغزش^{۱۴} در نظر گرفته شده است. با توجه به پایین بودن کسر حجمی فاز ثانویه (ذرات) از رویکرد اوپلرین - لاگرانژین و مدل فاز گسسته^{۱۵} برای مدل سازی حرکت ذرات به کار گرفته شده است.

جدول ۲: خواص فاز پیوسته و پراکنده

چگالی ($\frac{Kg}{m^3}$)	ویسکوزیته (Pa.s)
۱/۲۲۵	۰/۰۰۰۰۱۷۸
۹۰۰	-

سیال

ذرات

^۹ Reynolds Stress

^{۱۰} Upwind Second Order

^{۱۱} PRESTO!

^{۱۲} Inlet Velocity

^{۱۳} Pressure Outlet

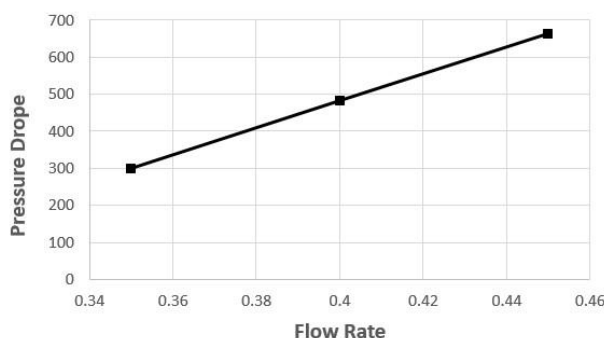
^{۱۴} No Slip

^{۱۵} Discrete Phase Model (DPM)

۷- نتایج

۷-۱- بررسی افت فشار در دبی حجمی های متفاوت

با افزایش دبی حجمی ورودی به سیکلون محوری، سرعت و آشفتگی سیال افزایش می‌یابد که باعث می‌شود اصطکاک و افت فشار نیز افزایش یابد. نتایج افت فشار در سه دبی مختلف در شکل ۵ قابل مشاهده است که نشان می‌دهد با افزایش دبی از ۰/۴ به ۰/۴۵ متر مکعب بر ثانیه افت فشار ۳۷ درصد افزایش می‌یابد.



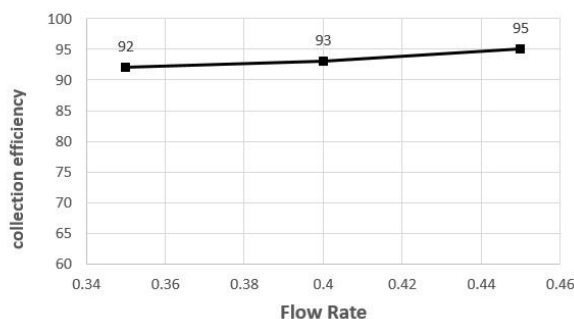
شکل ۵: نتایج افت فشار در دبی حجمی های مختلف

۷-۲- بررسی راندمان جداسازی ذرات

راندمان جداسازی ذرات به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\eta = \frac{n_{Trap}}{n_{Tracked}} \quad (7)$$

این رابطه نسبت ذرات به دام افتاده به کل ذرات تزریقی می‌باشد. نتایج راندمان جداسازی در شکل ۶ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دبی حجمی، راندمان جداسازی نیز افزایش می‌یابد. این افزایش راندمان را می‌توان به تأثیر افزایش نیروی گریز از مرکز وارد بر ذرات نسبت داد. با افزایش دبی حجمی، سرعت جریان افزایش یافته و در نتیجه نیروی گریز از مرکز بیشتری بر ذرات اعمال می‌شود، که این امر منجر به بهبود فرآیند جداسازی می‌گردد.

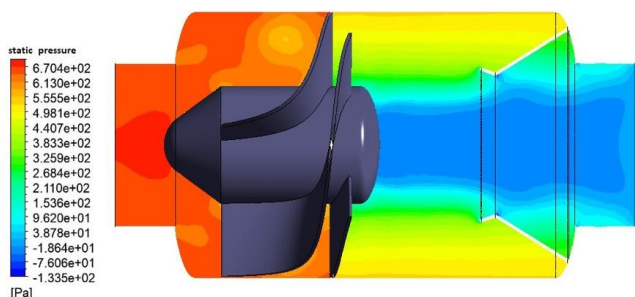


شکل ۶: نتایج راندمان جداسازی در دبی حجمی های مختلف

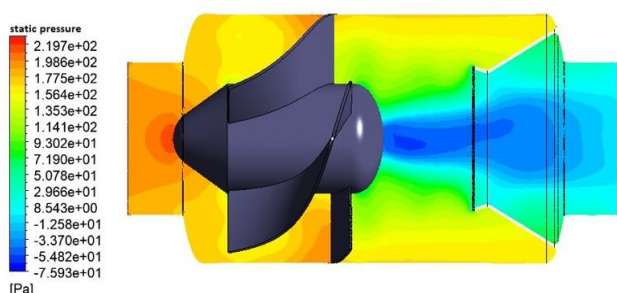
۷-۳- بررسی افت فشار در زاویه چرخش متفاوت پره

اثر زاویه چرخش پره به عنوان یک پارامتر کلیدی بر افت فشار در دبی حجمی ۰/۴۵ مترمکعب بر ثانیه در سیکلون جریان محوری بررسی شد. نتایج نشان داد که با کاهش زاویه چرخش پره از ۱۳۸ به ۹۰

درجه، افت فشار از ۶۶۴ پاسکال به ۲۱۵ پاسکال کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند به دلیل کاهش مقاومت جریان و کاهش تلاطم درون سیکلون باشد.



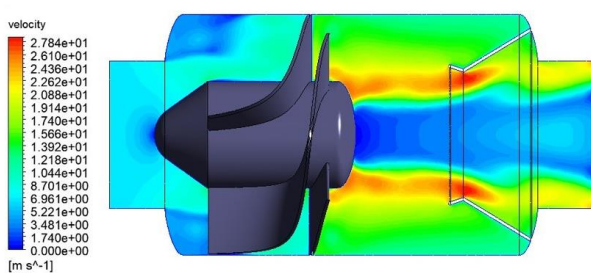
شکل ۷: کانتور فشار در زاویه دوران ۱۳۸ درجه



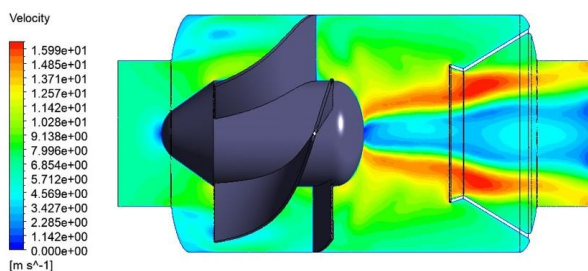
شکل ۸: کانتور فشار در زاویه دوران ۹۰ درجه

۷-۴- بررسی توزیع سرعت

در شکل‌های ۹ و ۱۰، توزیع سرعت در زوایای چرخش ۱۳۸ و ۹۰ ارائه شده است. با افزایش زاویه، جریان بیشتر تحت تأثیر پره قرار گرفته و آشفتگی بیشتری را تجربه می‌کند این امر باعث می‌شود مقدار بیشینه بزرگی سرعت در داخل سیکلون از ۱۵/۹ به ۲۷/۸ متر بر ثانیه افزایش یابد.



شکل ۹: توزیع بزرگی سرعت در زاویه دوران ۱۳۸ درجه



شکل ۱۰: توزیع بزرگی سرعت در زاویه دوران ۹۰ درجه

۸- نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد سیکلون محوری در جداسازی ذرات و افت فشار برای جرقه‌گیری موتور دیزل در سه دبی مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش دبی حجمی ورودی، راندمان جداسازی ذرات از ۹۲٪ به ۹۵٪ و افت فشار از ۳۰۰ به ۶۶۴ پاسکال افزایش می‌یابد. همچنین، تأثیر زاویه چرخش پره بر افت فشار، به عنوان یک عامل مهم در عملکرد موتور دیزل، مورد مطالعه قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که با کاهش ۷۷ درجه‌ای زاویه پره در اثر کاهش اصطکاک، افت فشار از ۶۶۴ به ۲۱۵ پاسکال کاهش می‌یابد که بیانگر تأثیر قابل توجه زاویه پره بر افت فشار است.

فهرست علائم

A	مساحت، m^2
E	مدول الاستیسیته، N/m^2
C_D	ضریب درگ
Re	عدد رینولدز
g	شتاب گرانش، m/s^2
Ma	عدد ماخ
علائم یونانی	
ρ	چگالی، kg/m^3
μ	ویسکوزیته دینامیکی، $Pa.s$
η	راندمان جداسازی ذرات
پایین نویس	
p	ذره

مراجع و منابع

- [1] Dziubak, T. and L. Bakała, *Computational and experimental analysis of axial flow cyclone used for intake air filtration in internal combustion engines*. Energies, 2021. 14(8): p. 2285.
- [2] Babaoğlu, N.U., et al., *The effect of axial cyclone inlet velocity and geometrical dimensions on the flow pattern, performance, and acoustic noise*. Powder Technology, 2022. 407: p. 117692.
- [3] Liu, L. and B. Bai, Numerical study on swirling flow and separation performance of swirl vane separator. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2017. 5(1).
- [4] Mao, Y., et al., *Orthogonal experimental design of an axial flow cyclone separator*. Chemical Engineering and Processing Process Intensification, 2019. 144: p. 107645.
- [5] Bose, P., et al., *Improved theoretical modeling of a cyclone separator as a diesel soot particulate arrester*. International Journal of automotive technology, 2010. 11: p. 1-10.
- [6] Ammar, M., et al., *Design Development for Centrifugal Diesel Particulate Arrester*. ARPN Journal Eng. Appl. Sci, 2020.
- [7] Dziubak, Tadeusz, Sebastian Dziubak, and Michał Tomaszewski. "Numerical Study of the Effect of Axial Cyclone Inlet Velocity and Geometrical Parameters on Separation Efficiency and Pressure Drop." *Powder Technology* 427 (2023): 118692.
- [8] Gopalakrishnan, B, G Kumar, and K Prakash. "Parametric Analysis and Optimization of Gas-Particle Flow through Axial Cyclone Separator: A Numerical Study." *Advanced Powder Technology* 34, no. 2 (2023): 103959.