

Design, Fabrication, and Performance Evaluation of an Air-Oil Separation Unit in Hydraulic Power Transmission Systems: A Numerical and Experimental Study

M. Shokatzadeh^a, P. Nikandish^{b*}

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Shokatzadeh M., Nikandish P. Design, Fabrication, and Performance Evaluation of an Air-Oil Separation Unit in Hydraulic Power Transmission Systems: A Numerical and Experimental Study. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025; 5(1): 88-112.

 <https://10.61186/masm.2026.2082192.1179>

KEYWORDS

Include at least 3 and at most 5 keywords or phrases in separate lines.

Air-Oil Separator
Experimental Validation
Hydraulic Systems

ABSTRACT

The entry of air into hydraulic power systems presents a key challenge for both stationary and mobile machinery. Given the performance limitations of conventional online deaeration methods, this research was conducted to design, fabricate, and optimize an air-oil separator unit. To simulate the turbulent flow and the physical separation mechanism, a three-dimensional, two-phase numerical model was developed, integrating the Volume of Fluid (VOF) and Discrete Phase Model (DPM) approaches. A laboratory-scale hydro-pneumatic test rig was designed and fabricated to validate the numerical model. A comparison between experimental and numerical results revealed a discrepancy of approximately 2.5% for separation efficiency and 5.6% for pressure drop, thereby confirming the model's validity for analyzing the variables affecting the separator's performance. The results indicated that separation efficiency exhibits a non-linear behavior, with an optimal inlet velocity range of 3.5 to 5.5 m/s establishing a balance between high efficiency (87.5–90%) and an acceptable pressure drop (735–1150 Pa). Furthermore, the geometric analysis identified optimal ranges for key parameters. Accordingly, optimal values for the conical section angle (5–6°), cylindrical diameter (36–40 mm), and air outlet diameter (18 mm) yielded separation efficiencies of 89%, 90%, and 90%, respectively. These findings provide a quantitative and reliable framework for the optimal design of air-oil separators, demonstrating that an effective balance between efficiency and energy consumption can be achieved by selecting appropriate geometric parameters. The implementation of this approach is expected to enhance the reliability and service life of hydraulic systems significantly.

Extended Abstract

1. Introduction

Hydraulic systems, as one of the most widely used technologies for power transmission, play a pivotal role in various industries. However, the performance of these systems is severely compromised by the fundamental challenge of air entrainment and its subsequent mixing with hydraulic oil. This phenomenon leads to increased fluid compressibility, reduced hydraulic stiffness, operational instability, cavitation, and a consequent decrease in overall efficiency [1]. Although traditional deaeration methods are employed in hydraulic power transmission systems, they are often beset by limitations, such as large physical footprints and low operational efficiency [2]. In contrast, cyclonic separators are recognized as an efficient solution for phase separation and deaeration in hydraulic power systems. Their advantages stem from a compact structure, the absence of moving parts, and the capability for continuous operation. They function by generating a strong vortex flow and harnessing centrifugal forces to segregate the phases [3]. Numerous studies have investigated the operational and geometric parameters affecting the performance of gas-liquid separators. For instance, research by Chen et al. on a two-stage air-water separator highlighted the importance of residence time and pressure distribution as key determinants of

* Corresponding author. Tel.: 061-42418500 Fax: 061-4241855

E-mail address: nikandish@jsu.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.2026.2082192.1179>

Received: December 17, 2025; Received in revised form: February 02, 2026; Accepted: February 23 2026.

2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



separation quality [10]. Concurrently, other studies have elucidated the critical role of geometry, particularly the conical section angle [11] and outlet diameter [17], in balancing efficiency against energy loss. Over time, the focus of research has shifted toward geometric optimization and the use of combined indices (e.g., efficiency and pressure drop) for evaluating separator performance [7, 9].

A review of prior literature indicates that the majority of these studies have concentrated on gas-liquid separators with low-viscosity fluids, predominantly air-water systems, or on specific applications within the oil and gas industry. In stark contrast, dedicated studies on air-hydraulic oil separators are notably scarce. This is particularly significant given that factors such as the high viscosity of hydraulic oil, the heightened sensitivity of hydraulic systems to pressure drop, and operational temperature constraints play a decisive role in the performance of such equipment, yet have been underexplored [5, 13]. Furthermore, a substantial portion of previous research has merely examined individual geometric or operational parameters in isolation, neglecting a comprehensive analysis of their simultaneous interaction and the resulting impact on multi-criteria performance metrics. This study is conducted to address this research gap. In this investigation, for the first time, a rotary air-hydraulic oil separator with compact dimensions, compatible with real-world operating conditions, has been designed, fabricated, and modified. Subsequently, the results from numerical simulations have been systematically validated through experimental measurements of key quantities. The study then proceeds to investigate the influence of operational and geometric parameters on performance metrics. To determine the optimal operating point, a combined technical-economic index, $\eta/\Delta P$, is employed to provide a practical framework for industrial designers. This approach, while filling the existing void, proposes a novel strategy for enhancing the reliability and efficiency of hydraulic power transmission systems.

2. Method

This research employed a combined experimental and numerical methodology to investigate the performance of an air-hydraulic oil separator. The study started with the design and fabrication of a physical prototype. The geometric parameters of the separator, detailed in Table 1, were established based on a synthesis of existing literature, conventional cyclone designs, technical recommendations from manufacturers, and an iterative trial-and-error process [14, 15]. The main components of the separator, including the conical and cylindrical sections, were constructed from AA 6061-T6 aluminum alloy, chosen for its suitable machinability, corrosion resistance, and adequate mechanical strength to withstand the typical operating pressures of hydraulic systems. Sealing between components was achieved using metric threads conforming to the ISO 6149 standard, supplemented with PTFE tape to ensure leak-proof operation. The fabricated prototype underwent a rigorous leak test according to the ISO 15649 standard, confirming the integrity of the construction and sealing methods.

To facilitate experimental validation, a dedicated hydro-pneumatic test circuit was designed and constructed. This circuit enabled precise and independent control of key flow parameters, including pressure, flow rate, and the injected air volume fraction. The hydraulic oil was supplied by a fixed-displacement gear pump (Vickers X2P5102), with system pressure regulated by a proportional relief valve (Tork Hydraulic EDG-01-H). Flow control was maintained using a pressure-compensated flow control valve (Parker GFG2PKC3) to ensure repeatable test conditions. Air was injected into the pump's suction line from a compressed air unit, with the injection rate precisely managed by a flow control valve and a pressure regulator. Key operational parameters, namely pressure and flow rate at the separator's inlet and outlet, were monitored using high-accuracy calibrated sensors (Parker SCPT-400 and SCFT-060), with data continuously acquired by a data acquisition unit (Parker SCM600).

A three-dimensional, unsteady, incompressible, and turbulent two-phase flow of air and hydraulic oil within the cyclone was numerically simulated using the finite volume method in ANSYS Fluent. Hydraulic oil (ISO VG46) was treated as the primary continuous Newtonian phase, with its physical properties (density: 913 kg/m³, dynamic viscosity: 0.042 Ns/m²) defined at a reference temperature of 40°C. Thermal effects and fluid compressibility were deemed negligible based on the operational range and prior studies [4, 7]. To capture the complex multiphase physics, a hybrid Eulerian-Lagrangian approach was employed. The volume of fluid (VOF) model was employed to track the air-oil interface and simulate the high-concentration air core, while the discrete phase model (DPM) was utilized to track the trajectory of discrete, low-volume-fraction air bubbles within the continuous oil phase, enabling two-way momentum exchange [8]. The motion of individual air bubbles was governed by a Lagrangian equation accounting for drag, buoyancy, and other forces [5].

The $k-\omega$ SST turbulence model was selected for its robust performance in near-wall regions and for predicting the behavior of strong swirling flows [6, 15]. A second-order upwind scheme was used for spatial discretization, and the pressure-velocity coupling was handled by the PISO algorithm, which is well-suited for transient simulations. The pressure field was solved using the PRESTO scheme for enhanced accuracy in swirling flows [7]. A structured hexahedral mesh was generated, with significant local refinement in critical regions such as the tangential inlet, near-wall areas, and the vortex core. A comprehensive grid independence study, using pressure drop as the convergence criterion [4], confirmed that a mesh of approximately 799,551 cells yielded results independent of grid size, with a final grid convergence index (GCI) of less than 0.6%.

3. Result

The analysis of the separator performance reveals a complex interplay between operational and geometric parameters governed by the underlying hydrodynamics of the swirling flow. The fundamental separation mechanism is characterized by the generation of a strong vortex flow from the incoming air-oil mixture, which establishes a distinct low-pressure core along the central axis. This pressure gradient induces a secondary, upward-flowing vortex that efficiently extracts the lighter air phase, while centrifugal forces drive the denser oil toward the walls. This flow structure, consistent with established cyclonic principles [15, 18], provides the foundation for evaluating the influence of key parameters on performance indicators such as separation efficiency (η), pressure drop (ΔP), and residence time (τ).

The effect of the inlet velocity demonstrates distinct nonlinear behavior. As the velocity increases, the pressure drop escalates following a power-law relationship ($\Delta P \cong 63.08V^{1.712}$), while the residence time decreases. Consequently, separation efficiency improves to a peak of 91% at 5 m/s as enhanced centrifugal forces promote phase separation. However, beyond this optimal point, efficiency declines to 80.3% at 9 m/s. This performance breakdown is attributed to detrimental high-velocity effects, including increased turbulence, bubble breakup, and insufficient residence time, leading to the entrainment of smaller oil droplets in the air outlet [5]. The multi-criteria performance index ($\eta/\Delta P$) reveals that the point of maximum efficiency does not coincide with the most energy-efficient operation. Therefore, an optimal operating velocity range of 3.5 to 5.5 m/s is identified, balancing high efficiency (87.5-90%) with a reasonable pressure drop (735-1150 Pa).

Geometric optimization of the conical section angle (θ) further underscores the need for balanced design. An increase in angle from 3° to 6° improves efficiency from 85% to 89% by strengthening the vortex, but further increase to $10-12^\circ$ causes a decline. This dual effect increases because a steeper cone reduces residence time and increases internal turbulence, leading to higher energy dissipation and oil droplet entrainment [4]. The $\eta/\Delta P$ index confirms the optimal range of $5-6^\circ$, where a dynamic equilibrium between the centrifugal force and residence time is achieved, delivering high efficiency (89%) with a moderate pressure drop (1000-1100 Pa).

Similarly, the cylindrical diameter (D_c) exhibits an optimal range of 36-40 mm. Increasing D_c from 30 mm to 40 mm enhances efficiency to a maximum of 90% due to a larger control volume and stronger centrifugal forces, while simultaneously reducing the pressure drop. Beyond 40 mm, a slight efficiency decrease occurs as the vortex core weakens, outweighing the benefits of increased residence time. The air outlet diameter (D_a) is identified as a critical design variable, with a clear optimum at 18 mm (approximately 45% of D_c). This diameter provides the crucial dynamic equilibrium between maintaining sufficient vortex strength for radial droplet migration and ensuring adequate residence time for effective separation. Both the $\eta/\Delta P$ index and fundamental design principles for gas-liquid cyclones corroborate this finding [15]. In conclusion, the study establishes that optimal separator performance is not a function of a single parameter but a result of a synergistic balance between geometric configuration and operational conditions.

4. Conclusion

This research was designed, fabricated, and evaluated an air-oil separator for hydraulic systems to mitigate air contamination. A combined experimental-numerical approach was employed, where a 3D two-phase model was successfully validated against experimental data. The study identified optimal operational and geometric parameters: an inlet velocity range of 3.5-5.5 m/s, a cone angle of $5-6^\circ$, a cylinder diameter of 40 mm, and an air outlet diameter of 18 mm, achieving efficiencies of nearly 90%. These findings provide a practical framework for designing high-efficiency separators, ultimately enhancing the reliability and service life of hydraulic power systems.



طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد یک واحد جداساز هوا از روغن در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی: مطالعه‌ی تجربی و عددی

مجید شوکت‌زاده^{الف}، پژمان نیک‌اندیش^{ب*}

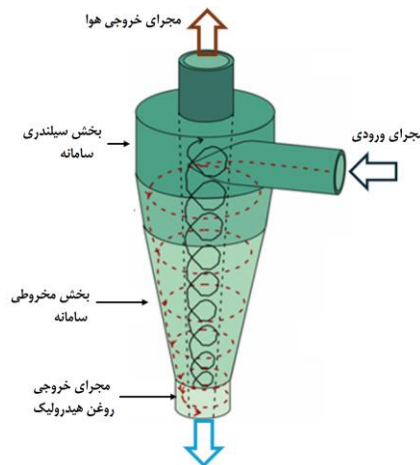
^{الف} دانش آموخته، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول، دزفول، ایران، majidshooger@gmail.com
^ب استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول، دزفول، ایران، nikandish@jsu.ac.ir

واژگان کلیدی	چکیده
جداساز هوا-روغن سامانه‌های هیدرولیکی اعتبارسنجی تجربی	ورود هوا به سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، چالشی بنیادین در ماشین‌های ثابت و متحرک به شمار می‌رود. از آنجا که، روش‌های متداول هواگیری برخط سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، با محدودیت‌های عملکردی مواجه‌اند، این پژوهش با هدف طراحی، ساخت و بهینه‌سازی یک واحد جداساز هوا-روغن انجام گردید. به منظور شبیه‌سازی جریان آشفته، و ساز و کار فیزیکی جداسازی هوا از روغن، یک مدل عددی سه‌بعدی دوفازی، مبتنی بر ترکیب رویکردهای حجم سیال (VOF) و فاز گسسته (DPM)، توسعه یافت. برای اعتبارسنجی مدل عددی، یک مدار هیدروپنوماتیک آزمایشگاهی، طراحی و ساخته شد. مقایسه‌ی میان نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی، با نتایج عددی، حاکی از اختلافی معادل، ۵/۲ درصد برای راندمان جداسازی، و ۶/۵ درصد برای افت فشار، بود. این امر، اعتبار مدل را برای تحلیل متغیرهای مؤثر بر عملکرد واحد جداساز هوا-روغن تایید کرد. نتایج نشان داد که راندمان جداسازی، رفتاری غیرخطی دارد و محدوده‌ی سرعت بهینه ۳/۵ تا ۵/۵ متر بر ثانیه، توازنی میان راندمان بالا (۹۰-۸۷٪) و افت فشار مناسب (۱۱۵۰-۷۳۵ پاسکال)، برقرار می‌سازد. علاوه بر این، تحلیل هندسی واحد جداساز، بازه‌های بهینه‌ی کمیت‌های کلیدی را مشخص نمود. بر این اساس، مقادیر بهینه‌ی شیب بخش مخروطی (۵-۶ درجه)، قطر بخش استوانه‌ای (۳۶-۴۰ میلی‌متر) و قطر خروجی هوا (۱۸ میلی‌متر)، به ترتیب، به راندمان‌هایی معادل، ۸۹٪، ۹۰٪ و ۹۰٪، منجر شدند. بر این اساس، با انتخاب پارامترهای هندسی مناسب، می‌توان به توازنی مؤثر میان راندمان و مصرف انرژی در واحد جداساز هوا-روغن دست یافت که پیاده‌سازی آن، ارتقای قابلیت اطمینان و عمر مفید سامانه‌های هیدرولیکی را به همراه خواهد داشت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۴	

۱- مقدمه

سامانه‌های هیدرولیکی به‌عنوان یکی از پرکاربردترین فناوری‌های انتقال و کنترل توان در صنایع مختلف نظیر ماشین‌آلات صنعتی، تجهیزات متحرک، صنایع هوایی، دریایی و سیستم‌های انرژی، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. یکی از چالش‌های بنیادین در بهره‌برداری از این سامانه‌ها، حضور و نفوذ هوا در روغن هیدرولیکی است که می‌تواند عملکرد آن‌ها را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار دهد [۲]. ورود هوا به روغن، پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر در بسیاری از سامانه‌های انتقال توان

هیدرولیکی است که از طریق مکش هوا از اتصالات معیوب، آشفستگی جریان در مخازن، اختلاط مکانیکی در پمپ‌ها و افت فشار موضعی و کاویتاسیون، رخ می‌دهد [۱ و ۳]. وجود فاز گازی در سیال، پیامدهای مخرب متعددی را به همراه دارد؛ از این جمله می‌توان به افزایش تراکم‌پذیری سیال که منجر به کاهش سختی هیدرولیکی و ناپایداری کنترلی می‌گردد، و نیز بروز پدیده‌هایی نظیر کاویتاسیون، سایش شتاب‌دار، ارتعاش و نویز اشاره کرد [۴]. علاوه بر این، هوا باعث افزایش اکسیداسیون روغن، کاهش خواص روانکاری و افت راندمان حجمی پمپ‌ها شده و در نهایت، عمر مفید کل سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد [۵]. با توجه به این آثار مخرب، هواگیری مؤثر روغن، به‌عنوان یک الزام اساسی مطرح می‌شود. روش‌های متداول مانند مخازن آرام‌ساز و جداکننده‌های ثقلی، اغلب با محدودیت‌هایی نظیر حجم زیاد، کارایی پایین در دبی‌های بالا و حساسیت به شرایط کاری مواجه هستند [۶]. جداسازها (سیکلون‌ها) به‌عنوان یکی از ساده‌ترین و کارآمدترین تجهیزات جداسازی، با ویژگی‌هایی نظیر ساختار فشرده، عدم نیاز به قطعات متحرک و قابلیت عملکرد پیوسته، طی دهه‌های گذشته به‌طور گسترده در جداسازی فازهای گاز-جامد، گاز-مایع و مایع-جامد به کار گرفته شده‌اند [۷]. در شکل (۱)، ساختار درونی یک سامانه‌ی جدا ساز متداول در صنعت نشان داده شده است. مطابق شکل (۱)، جداسازها، با ایجاد یک میدان گردابه‌ای قوی و بهره‌گیری از نیروی گریز از مرکز عمل می‌کنند تا فازهایی با چگالی متفاوت را از هم تفکیک نمایند [۸]. جداساز، شامل یک ورودی مماسی، برای ایجاد گردابه‌ی اولیه، یک بخش استوانه‌ای، برای توسعه‌ی میدان گردابی، و یک بخش مخروطی، برای تشدید گردابان فشار شعاعی و هدایت فازها به خروجی‌های مجزا می‌باشد [۹].



شکل ۱ ساختار درونی یک سامانه‌ی جداساز متداول در صنعت

پژوهش‌های متعددی به بررسی کمیت‌های عملیاتی و هندسی مؤثر بر عملکرد جداسازهای چرخشی پرداخته‌اند. با این حال، با وجود اهمیت روزافزون کنترل آلودگی هوا در سامانه‌های هیدرولیکی، کاربرد این فناوری برای هواگیری در این نوع سامانه‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، چن و همکاران، یکی از نخستین مطالعات نظام‌مند را بر روی یک جداساز دومرحله‌ای هوا-آب انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که افزایش دبی هوای ورودی، ضمن تقویت میدان گردابه، افت فشار نسبی را کاهش می‌دهد [۱۰]. این پژوهش، اهمیت زمان ماند و توزیع فشار را به عنوان عوامل تعیین‌کننده در کیفیت جداسازی برجسته ساخت. همزمان، تحقیقاتی مانند مطالعه‌ی کومار و همکاران، بر روی جداسازهای مایع-جامد (آب-ذرات معدنی)، نقش کلیدی هندسه را بر عملکرد آشکار ساختند. آن‌ها نشان دادند که تغییر زاویه‌ی بخش مخروطی، موازنه‌ای میان سرعت خروج جریان و افت انرژی برقرار می‌کند و این یافته‌ها، بنیانی برای تحقیقات بعدی در زمینه‌ی بهینه‌سازی هندسی فراهم آورد [۱۱]. در ادامه، ژانگ و همکاران، با شبیه‌سازی عددی جریان گاز-جامد (هوا-ذرات خاک)، وابستگی شدید ساختار گردابه مرکزی به سرعت ورودی و ابعاد هندسی جداساز را تأیید کرده و به درک عمیق‌تری از دینامیک جریان داخلی دست یافتند [۱۲]. با گذشت زمان، تمرکز پژوهش‌ها به سمت کاربردهای پیچیده‌تر معطوف شد. بای و همکاران، با ارائه یک مطالعه جامع بر جداسازهای هوا-آب، سازوکار جداسازی را از طریق تحلیل دینامیک حباب‌ها تشریح کردند و نقش حیاتی گردابه ثانویه محوری و ناحیه کم‌فشار مرکزی در هدایت فاز گازی را مشخص ساختند [۸]. این درک عمیق‌تر، زمینه را برای بررسی

کاربردهای صنعتی فراهم کرد؛ به طوری که سیون و همکاران، عملکرد یک جداساز هوا-روغن صنعتی را بررسی کرده و رفتار غیرخطی راندمان جداسازی را در مقابل افزایش سرعت ورودی نشان دادند [۵]. تحقیقات بعدی، پیچیدگی‌های ناشی از خواص سیال را نیز در نظر گرفتند. برای نمونه، لی و همکاران، نشان دادند که در سیالات ویسکوز، افزایش گرانروی بیشتر از آنکه بر راندمان اثر بگذارد، موجب افزایش قابل توجه افت فشار می‌شود [۱۳]. همزمان، پژوهشگرانی مانند شی و همکاران [۱۴] و همچنین، سیلوا و لی [۵]، به محدودیت‌های جداسازی پرداختند و نشان دادند که ناپایداری گردابه‌ی ثانویه و خردشدگی حباب‌ها در اثر تنش برشی بالا، می‌تواند منجر به انتقال ناخواسته مایع به خروجی گاز شود. در سال‌های اخیر، روند تحقیقات به سمت بهینه‌سازی هندسی و توسعه شاخص‌های ارزیابی ترکیبی حرکت کرده است. ژان نشان داد که با به کارگیری یک طراحی نوآورانه، می‌توان به طور همزمان راندمان و افت فشار را بهبود بخشید، مشروط بر آنکه پایداری ساختار گردابه حفظ شود [۹]. این رویکرد در تحقیقات جدیدتر نیز دنبال شد. باروا و همکاران [۱۵]، با اصلاح هندسه ورودی، و چن و همکاران [۱۶]، با بهینه‌سازی زاویه‌ی بخش مخروط جداساز، به دنبال یافتن یک نقطه بهینه برای موازنه میان شدت گردابه و افت انرژی بودند. مائو و همکاران نیز تأثیر قطر مجرای خروجی را بر این موازنه بررسی و نتایج خود را قابل تعمیم برای جداسازها گاز-مایع دانستند [۱۷]. در نهایت، پژوهشی مانند سایوریادی، این تکامل را با تأکید بر لزوم استفاده از شاخص‌های ترکیبی (راندمان و افت فشار) برای ارزیابی عملکرد به اوج رساند و نشان داد که پژوهش‌های امروزی به دنبال نگاهی جامع و همه‌جانبه به کارایی جداسازها هستند [۷].

مروری بر پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که تمرکز عمده آن‌ها بر جداسازهای گاز-مایع با سیالات کم‌ویسکوز، عمدتاً در سامانه‌های هوا-آب، یا بر کاربردهای خاص صنایع نفت و گاز معطوف بوده است. در مقابل، مطالعات اختصاصی پیرامون جداسازهای هوا-روغن هیدرولیکی بسیار محدود است. این در حالی است که عواملی نظیر گرانروی بالای روغن، حساسیت شدید سامانه‌های هیدرولیکی به افت فشار، و محدودیت‌های دمایی، نقشی تعیین‌کننده در عملکرد این تجهیزات ایفا می‌کنند. افزون بر این، بخش قابل توجهی از تحقیقات پیشین، تنها به بررسی مجزای برخی کمیت‌های هندسی یا عملیاتی بسنده کرده و از تحلیل جامع برهم‌کنش هم‌زمان این عوامل و اثر آن‌ها بر شاخص‌های چندمعیاره عملکردی غفلت ورزیده‌اند. پژوهش حاضر با هدف پاسخ به این خلأ پژوهشی انجام شده است. در این تحقیق، برای نخستین بار یک جداساز چرخشی هوا-روغن هیدرولیکی با ابعادی فشرده و سازگار با شرایط واقعی بهره‌برداری، طراحی، ساخته و اصلاح شده است. سپس، با اندازه‌گیری تجربی کمیت‌های کلیدی نظیر افت فشار و راندمان جداسازی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی به صورت نظام‌مند صحت‌سنجی شده‌اند. در ادامه، تأثیر کمیت‌های عملیاتی (سرعت ورودی) و هندسی (شامل شیب بخش مخروطی، قطر بخش استوانه‌ای و قطر مجرای خروجی هوا)، بر شاخص‌های عملکردی، شامل راندمان جداسازی، افت فشار و زمان ماند، بررسی شده است. همچنین، برای تعیین نقطه بهینه عملکرد، از شاخص ترکیبی $\eta/\Delta P$ ، به عنوان معیاری فنی-اقتصادی بهره می‌گیرد. در نهایت، این پژوهش، بازه‌های بهینه‌ای برای کمیت‌های هندسی طراحی ارائه می‌دهد تا چارچوبی کاربردی برای طراحان صنعتی فراهم آورد. این رویکرد، ضمن پرکردن خلأ موجود، راهکاری نوین برای ارتقای قابلیت اطمینان و راندمان سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی پیشنهاد می‌کند.

۲- روش انجام پژوهش

۲-۱- مدل فیزیکی

در شکل (۲)، کمیت‌های هندسی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی معرفی و در جدول (۱)، مقادیر عددی یا محدوده‌ی تغییرات آن‌ها آمده است. در این پژوهش، طراحی هندسی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن، با بهره‌گیری از مطالعات محدود موجود در ادبیات موضوع، به کارگیری هندسه‌های متداول جداسازهای گردابی، پیشنهادات فنی برخی شرکت‌های سازنده، و همچنین فرآیند سعی و خطا، انجام شده است [۱۴ و ۱۵].

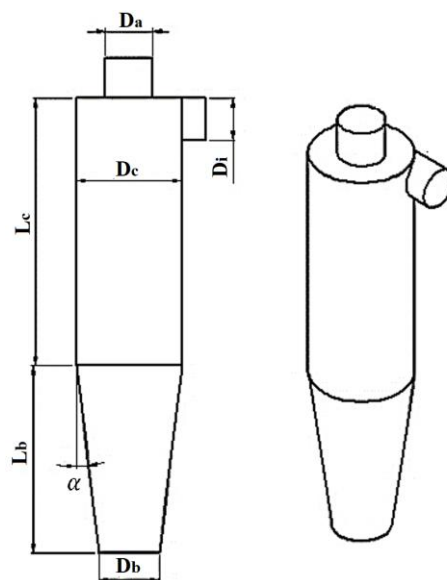
۲-۲- معادلات حاکم

در این پژوهش، جریان دوفازی هوا-روغن در سیکلون جداساز به صورت سه‌بعدی، ناپایا، تراکم‌ناپذیر و آشفته مدل‌سازی گردید. روغن هیدرولیکی به‌عنوان فاز پیوسته‌ی نیوتنی با خواص فیزیکی ثابت در نظر گرفته شد و میدان جریان آن، با حل معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس شبیه‌سازی گردید. اثرات تغییرات دما و تراکم در محدوده عملیاتی سیکلون مطابق داده‌های تجربی ناچیز فرض شد [۷]:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{int} \quad (2)$$

که در آن، \mathbf{u} بردار سرعت، p فشار، ρ چگالی، μ ویسکوزیته دینامیکی و \mathbf{F}_{int} نیروهای برهم‌کنش بین فازها هستند. اثرات انتقال حرارت در این مطالعه نادیده گرفته شد، زیرا بر اساس گزارش‌های پیشین، تأثیر آن بر مکانیزم جداسازی در جداسازهای سیکلونی هوا-روغن ناچیز است [۴].



شکل ۲ هندسه‌ی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی

جدول ۱ کمیت‌های هندسی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی

مقدار عددی	کمیت هندسی
۵۰-۳۰ mm	قطر بخش استوانه‌ای (D_c)
۷۰ mm	طول بخش استوانه‌ای (L_c)
۱۰۰ mm	طول بخش مخروطی (L_b)
۱۰-۲۶ mm	قطر مجرای خروجی هوا (D_a)
۲-۱۲ درجه	شیب بخش مخروطی (θ)
۱۵/۷ mm	قطر مجرای ورودی (D_i)

برای شبیه‌سازی جریان آشفته با ساختار گردابه‌ای قوی، مدل $k-\omega$ SST به کار گرفته شد که توانایی مناسبی در بازتولید رفتار جریان در نواحی نزدیک دیواره و هسته گردابه مرکزی دارد [۶ و ۱۵]. لایه‌ی نزدیک دیواره با استفاده از تابع دیواره استاندارد و شبکه با وضوح کافی برای پوشش لایه مرزی مدل شد. معادلات انتقال انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اتلاف ویژه (ω)، به صورت زیر حل شدند [۶]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{u}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (۳)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \omega \mathbf{u}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (۴)$$

که در آن، P_k ، نرخ تولید آشفتگی و μ_t ، ویسکوزیته آشفتگی، است. در ضمن، رفتار فاز هوا در سامانه‌ی جداساز، به دو رژیم متمایز شامل، هسته‌ی هوای مرکزی با غلظت بالا و حباب‌های پراکنده هوا با کسر حجمی کم، تقسیم می‌شوند. برای شبیه‌سازی هسته‌ی مرکزی و رهگیری سطح مشترک هوا-روغن در سیکلون، از مدل چندفازی حجم سیال (VOF)، استفاده شد. در این چارچوب، هوا و روغن به‌عنوان دو فاز پیوسته هم‌مکان در نظر گرفته شدند و انتقال سطح مشترک میان آن‌ها از طریق حل معادله کسری حجمی فاز هوا انجام گرفت [۸]:

$$\frac{\partial \alpha_{air}}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_{air} \mathbf{u}) = 0 \quad (۵)$$

که در آن α_{air} ، کسری حجمی هوا و \mathbf{u} ، بردار سرعت جریان مخلوط است. خواص مؤثر سیال در هر سلول محاسباتی، بر اساس میانگین‌گیری وزنی کسری حجمی فازها محاسبه شد، به‌گونه‌ای که چگالی مخلوط به صورت زیر تعریف می‌گردد [۸]:

$$\rho = \alpha_{air} \rho_{air} + (1 - \alpha_{air}) \rho_{oil} \quad (۶)$$

این مدل، امکان بازتولید، شکل‌گیری و پایداری هسته‌ی مرکزی و توزیع نواحی با غلظت بالای هوا را فراهم می‌کند. هم‌زمان، حباب‌های پراکنده هوا با کسر حجمی کم، به‌صورت مستقل با مدل فاز گسسته (DPM) رهگیری شدند، به‌گونه‌ای که تبادل مومنتوم میان حباب‌ها و فاز روغن بدون دوباره‌شماری جرم هوا در مدل حجم سیال لحاظ می‌شود. بدین ترتیب، مدل VOF، برای تحلیل رفتار کلان فاز هوا و شکل‌گیری هسته مرکزی، و مدل DPM، برای دینامیک حباب‌ها به‌طور مستقل به‌کار گرفته شد [۸]. معادله‌ی حرکت هر حباب هوا به صورت لاگرانژی به شکل زیر بیان شد [۵]:

$$m_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = F_D(\mathbf{u} - \mathbf{v}_p) + F_B + F_C + F_{other} \quad (۷)$$

که در آن، \mathbf{v}_p سرعت حباب، m_p جرم حباب، F_D نیروی درگ، F_B نیروی شناوری، F_C اثر میدان چرخشی و F_{other} نیروهای ناشی از آشفتگی و تغییرات فشار موضعی هستند. برای مدل‌سازی اثر آشفتگی جریان بر پخش و زمان ماند حباب‌ها از مدل پراکندگی تصادفی استفاده شد و توزیع اندازه و زمان حرکت حباب‌ها بر اساس داده‌های تجربی تعیین گردید [۹]. بدین ترتیب، مدل حجم سیال برای شبیه‌سازی رفتار کلان هسته‌ی مرکزی و مدل فاز گسسته برای تحلیل دینامیک حباب‌های پراکنده به‌طور مستقل استفاده شدند. این تفکیک در سطح فیزیکی و عددی، امکان تحلیل هم‌زمان ساختار جریان گردابه‌ای و سازوکار جداسازی حباب‌ها را با دقت بالا فراهم می‌کند و با رویکردهای پذیرفته‌شده در مطالعات عددی معتبر هم‌راستا است [۵ و ۸].

۲-۳- شرایط مرزی و اولیه

در این پژوهش، عملکرد یک سامانه‌ی جداساز هوا-روغن، تحت شرایط کاری متداول سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، تحلیل اثر شرایط جریان ورودی و ویژگی‌های هندسی جداساز بر پارامترهای عملکردی آن شامل الگوهای جریان گردابه‌ای، زمان ماند، افت فشار و راندمان جداسازی است. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، سیال کاری روغن هیدرولیک ISO VG46 در نظر گرفته شد. خواص فیزیکی روغن در دمای مرجع 40°C شامل گرانیوی دینامیکی (μ) و جرم مخصوص (ρ)، به ترتیب برابر 0.042Ns/m^2 و 913kg/m^3 ، ثابت فرض شد. این فرض، با توجه به دامنه‌ی محدود تغییرات دما در واحدهای جداساز هوا-روغن معتبر بوده و با مطالعات عددی و تجربی مشابه همخوانی دارد [۱۳]. جریان ورودی مخلوط هوا-روغن به‌صورت کسری حجمی شامل ۹۰ درصد روغن و ۱۰ درصد هوا تعریف شد، به‌گونه‌ای که فاز روغن به‌عنوان فاز پیوسته و فاز هوا به‌عنوان فاز گازی در مدل عددی لحاظ گردید. فاز گازی شامل حباب‌های هوا است

که به صورت گسسته در روغن توزیع شده‌اند. حرکت این حباب‌ها تحت تأثیر میدان گردابه‌ای قوی، نیروی گریز از مرکز و برهم‌کنش با فاز مایع، نقش اصلی را در مکانیزم جداسازی ایفا می‌کند. بر همین اساس، جریان به صورت سه‌بعدی، گذرا و دوفازی مدل شد تا فرآیندهای ناپایای حرکت، تمرکز و خروج حباب‌ها از هسته‌ی جریان با دقت ثبت شوند. به منظور تفکیک و تحلیل اثر کمیت‌های مؤثر بر عملکرد سامانه، مطالعه حاضر در قالب چند حالت شبیه‌سازی طراحی شد. در این چارچوب، در مرحله‌ی نخست، اثر شرایط جریان ورودی شامل سرعت ورودی فاز مخلوط، به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شدت گردابه، افت فشار و راندمان جداسازی، در بازه‌ای متناسب با کاربردهای صنعتی تغییر داده شد. در این مرحله، هندسه‌ی سامانه‌ی جداساز بدون تغییر در نظر گرفته شد و شبیه‌سازی‌ها برای مقادیر مختلف سرعت ورودی مخلوط هوا-روغن در محدوده‌ی ۰/۵-۹ متر بر ثانیه انجام گرفت تا اثر تغییرات هیدرودینامیکی جریان بدون تداخل با تغییرات هندسی قابل ارزیابی باشد. در مرحله‌ی دوم، جریان ورودی ثابت نگه داشته شد و پارامترهای هندسی شامل قطر بخش استوانه‌ای، قطر مجرای خروجی هوا و شیب بخش مخروطی، تغییر کردند تا اثرات هندسه بر عملکرد سامانه مستقل از شرایط جریان ورودی تحلیل شود. در تحلیل عددی، جریان مخلوط هوا-روغن عبوری از سامانه‌ی جداساز، چند فرض اساسی به شرح زیر اعمال شد:

- روغن و هوا هر دو تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شدند.

- انتقال حرارت بین فازها و دیواره‌ها نادیده گرفته شد (بر اساس مطالعات [۴ و ۹]، اثرات حرارتی بر ساز و کار جداسازی و الگوی جریان گردابه‌ای قابل صرف‌نظر هستند).

- تمامی دیواره‌ها صاف و بدون زبری فرض شده و شرط مرزی بدون لغزش اعمال گردید.

- نشت داخلی، تغییر شکل سازه و اثرات ارتعاشی نادیده گرفته شدند.

- در خروجی جداساز، شرط مرزی فشار ثابت اعمال شد.

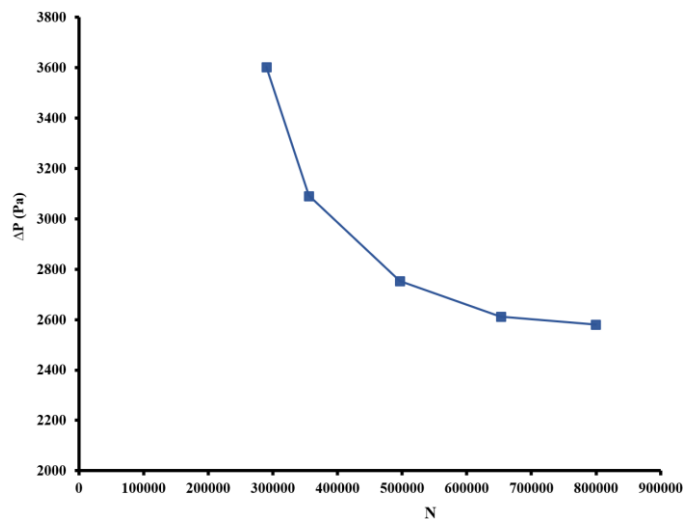
این مجموعه شرایط اولیه و مرزی با چارچوب مطالعات عددی و تجربی معتبر همخوانی دارد و امکان تحلیل دقیق اثرات جریان ورودی و هندسه بر کمیت‌های عملکردی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی را فراهم می‌کند [۶].

۲-۴- روند حل عددی

حل عددی جریان دوفازی هوا-روغن در سامانه‌ی جداساز با استفاده از روش حجم محدود انجام شد. معادلات حاکم بر جریان، شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم، معادلات انتقال آشفتگی و معادلات کسری حجمی فاز گازی بوده و برای گسسته‌سازی مکانی معادلات مومنتوم و معادلات آشفتگی، از طرح بالادست مرتبه دوم استفاده شد که دقت بالایی در نواحی با گرادیان شدید سرعت و فشار ارائه می‌دهد. این انتخاب، مطابق با مطالعات پیشین جداسازهای گاز-مایع، مناسب برای جریان‌های گردابه‌ای و با شیب‌های سرعت بالا شناخته شده است [۱۲]. برای برقراری ارتباط بین میدان فشار و سرعت، از الگوریتم PISO، در حلگر فشار محور نرم‌افزار ANSYS Fluent استفاده شد. این الگوریتم برای شبیه‌سازی گذرا و جریان‌های دو فازی گردابه‌ای مناسب و پایدار است [۱۵]. حل معادله فشار با استفاده از روش PRESTO، انجام شد که دقت بیشتری در جریان‌های گردابه‌ای با چرخش محوری قوی نسبت به روش‌های استاندارد ارائه می‌دهد [۷]. رهگیری مسیر ذرات هوا با مدل فاز گسسته (DPM) انجام شد و تعامل بین ذرات و جریان روغن به صورت دوطرفه در نظر گرفته شد تا اثر ذرات بر جریان روغن و اثر جریان روغن بر ذرات، به دقت شبیه‌سازی شود. اندازه ذرات مطابق داده‌های تجربی سیکلون تعیین شد و سرعت اولیه هر ذره با شرایط جریان ورودی هماهنگ گردید تا شرایط ورود واقعی ذرات به سامانه بازتولید شود [۵]. این رویکرد اطمینان می‌دهد که حرکت ذرات تحت تأثیر میدان گردابه‌ای و نیروهای گریز از مرکز و برهم‌کنش با فاز روغن، به صورت واقعی شبیه‌سازی شده است. گام زمانی حل عددی برابر با 10^{-4} ثانیه انتخاب شد تا تغییرات سریع جریان و مسیر ذرات، به ویژه در نزدیکی دیواره‌ها و هسته گردابه، با دقت ثبت شود. برای ارزیابی حساسیت عددی، نتایج با نصف کردن گام زمانی مقایسه شد و اختلاف در راندمان جداسازی کمتر از یک درصد بود که نشان‌دهنده‌ی پایداری و همگرایی عددی مناسب است. عیار همگرایی در هر گام زمانی، رسیدن پسماند تمام معادلات، به کمتر از 10^{-5} تعیین شد.

۲-۵- شبکه محاسباتی و استقلال از شبکه

برای گسسته‌سازی دامنه محاسباتی سامانه‌ی جداساز هوا-روغن، از شبکه‌بندی سه‌بعدی و سلول‌های شش‌وجهی استفاده شد. این نوع شبکه به دلیل هم‌راستایی مناسب با مسیر جریان‌های گردابه‌ای و کاهش نفوذ عددی، در شبیه‌سازی جداسازهای گاز-مایع رایج است [۸]. برای افزایش دقت در نواحی بحرانی، پالایش موضعی شبکه، در کانال ورودی مماسی، مجاورت دیواره‌ها، هسته‌ی گردابه مرکزی، اتصال بخش استوانه‌ای به مخروط و خروجی‌ها انجام شد. در این نواحی به دلیل وجود گرادیان‌های شدید فشار، سرعت و کسر حجمی فازها، ریزسازی شبکه، نقش تعیین‌کننده‌ای در پیش‌بینی صحیح توزیع فاز، و جلوگیری از بروز خطاهای عددی دارد. کیفیت شبکه‌های تولیدشده با استفاده از معیارهای کیفیت شبکه شامل اعوجاج سلول، درستی زاویه‌ای و نسبت ابعاد بررسی شدند و مقادیر همه معیارها در محدوده‌ی قابل قبول قرار داشت. به‌منظور اطمینان از استقلال نتایج عددی از اندازه‌ی شبکه، یک مطالعه جامع استقلال حل، از شبکه‌بندی، انجام شد. با توجه به ماهیت پیچیده‌ی جریان در جداسازهای گاز-مایع، و بر اساس نتایج حاصل از پژوهش سیون و همکاران، افت فشار کل سامانه به‌عنوان شاخص اصلی ارزیابی همگرایی انتخاب شد [۴]. در شکل (۳)، روند تغییرات افت فشار سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، بر حسب تعداد سلول‌ها (N)، در حوزه محاسباتی، نشان داده شده است.



شکل ۳ روند تغییرات افت فشار سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی بر حسب تعداد سلول‌ها در حوزه محاسباتی

مطابق شکل (۳)، با افزایش تعداد سلول‌ها از ۲۸۹۶۸۰ به ۷۹۹۵۵۱، مقدار افت فشار به‌تدریج کاهش یافته و اختلاف بین دو شبکه ریز نهایی به کمتر از ۱ درصد می‌رسد. این رفتار بیانگر نزدیک شدن حل عددی به ناحیه‌ی مستقل از شبکه است. بر اساس معیار ارائه‌شده توسط سایوربادی، زمانی که تغییرات کمیت‌های عملکردی بین دو شبکه متوالی کمتر از ۱ تا ۲ درصد باشد، حل عددی را می‌توان مستقل از شبکه تلقی کرد که این شرط در پژوهش حاضر به‌طور کامل برقرار است [۷]. به‌منظور ارزیابی کمی خطای ناشی از گسسته‌سازی عددی، شاخص همگرایی شبکه (GCI)، برای افت فشار محاسبه شد. مقدار کمی این شاخص، برای شبکه نهایی حدود ۰/۶ درصد است که نشان‌دهنده‌ی سهم بسیار ناچیز خطای عددی ناشی از شبکه‌بندی و قابلیت اعتماد بالای نتایج شبیه‌سازی می‌باشد. استفاده از شاخص GCI، به‌عنوان ابزار استاندارد اعتبارسنجی عددی در شبیه‌سازی جداسازهای چرخشی، در مطالعات مروری وانگ همکاران، نیز توصیه شده است [۶]. در نهایت، با در نظر گرفتن نتایج مطالعه‌ی استقلال از شبکه، تحلیل عدم قطعیت عددی و ملاحظات هزینه‌ی محاسباتی، شبکه شامل ۷۹۹۵۵۱ سلول، به‌عنوان شبکه‌ی بهینه و مستقل از شبکه انتخاب شد. در این شبکه، مقدار بیشینه‌ی اعوجاج سلول، برابر با ۰/۴۱ بوده که به‌مراتب کمتر از حد بحرانی توصیه‌شده برای شبیه‌سازی جریان‌های گردابه‌ای است. همچنین نسبت ابعاد سلول‌ها مقدار متوسط ۴/۹۱ را نشان می‌دهد که بیانگر کشیدگی کنترل‌شده سلول‌ها و عدم وجود سلول‌های بدشکل در نواحی بحرانی

دامنه‌ی محاسباتی است. بررسی شاخص درستی زاویه‌ای نیز مقادیر بالاتر از $0/8$ را در اکثر سلول‌ها نشان داد که نشان‌دهنده‌ی هم‌راستایی مناسب آن‌ها با جهت‌های غالب جریان و کاهش خطای گسسته‌سازی عددی می‌باشد. ترکیب این شاخص‌ها تأیید می‌کند که شبکه نهایی از کیفیت هندسی مطلوبی برخوردار بوده و قادر است ساختار پیچیده‌ی جریان گردابه‌ای، توزیع فاز هوا و روغن و شاخص‌های عملکردی سامانه‌ی جداساز را با دقت و قابلیت اعتماد بالا، بازتولید کند.

۲-۶- طراحی و ساخت واحد جداساز هوا از روغن هیدرولیکی

در شکل (۴)، نمایی کلی از سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، به‌همراه مراحل ساخت اجزای آن، ارائه می‌دهد. اجزای اصلی این سامانه، از آلیاژ آلومینیوم AA 6061-T6 ساخته شده‌اند. این آلیاژ، به‌دلیل قابلیت ماشین‌کاری مناسب، مقاومت مطلوب در برابر خوردگی و استحکام مکانیکی کافی برای تحمل فشارهای کاری متداول در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، انتخاب شده است.

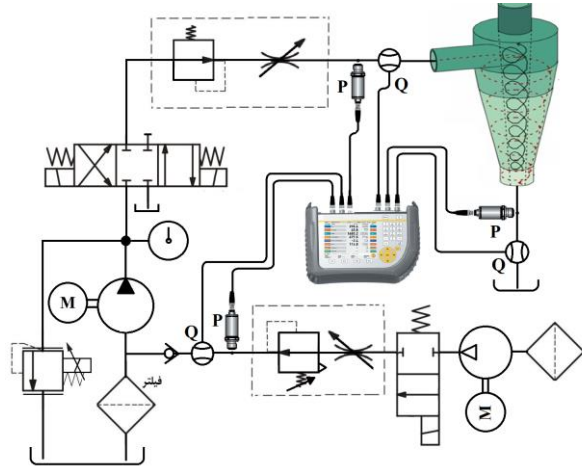


شکل ۴ مراحل ساخت و برهم‌بندی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی

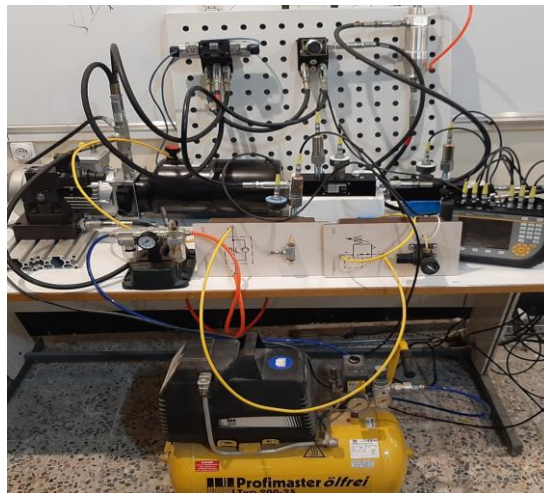
سامانه‌ی جداساز، از سه بخش اصلی شامل، بخش مخروطی، بخش سیلندری و خروجی هوا، تشکیل شده است. اتصال اجزاء و تضمین درزبندی در برابر فشارهای کاری سامانه‌ی جداساز هوا از روغن، توسط رزوه‌های متریک، مطابق با استاندارد ISO 6149 محقق شده است که امکان آب‌بندی مناسب، را فراهم می‌کند. تمامی قطعات، مطابق با جزئیات ارائه شده در شکل (۲)، با استفاده از فرآیند ماشین‌کاری ساخته شده‌اند. تolerانس‌های ابعادی به‌گونه‌ای کنترل شده‌اند که ضمن تضمین دقت برهم‌بندی قطعات، عملکرد مطلوب درزبندی، نیز حاصل شود. برای این منظور، تolerانس ابعادی برای سطوح عملکردی و نواحی درگیر در درزبندی، $\pm 0/02$ میلی‌متر، و برای سایر سطوح غیرحساس، $\pm 0/05$ میلی‌متر، در نظر گرفته شد. به‌منظور افزایش اطمینان از درزبندی اتصالات، علاوه بر رزوه‌ها، از نوار تفلون مخصوص سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی (PTFE)، با ضخامت $0/2$ میلی‌متر و عرض 12 میلی‌متر، در محل اتصال بخش‌های مختلف سامانه، استفاده شده است. پایداری شیمیایی بالا و مقاومت مناسب این ماده در برابر روغن‌های هیدرولیکی، آن را به گزینه‌ای مناسب برای کاربرد حاضر تبدیل کرده است. در نهایت، پس از برهم‌بندی، آزمون اعتبارسنجی نشت بر روی سامانه، بر اساس استاندارد ISO15649 انجام شد. در این آزمون، سامانه‌ی جداساز، با روغن هیدرولیکی پر و تحت فشار ثابت، معادل $1/5$ برابر فشار کاری نامی، به مدت 30 دقیقه، قرار گرفت. عدم مشاهده‌ی هر گونه نشت روغن در شرایط کاری سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، موفقیت‌آمیز بودن فرآیند ساخت و اثر بخشی رویکردهای درزبندی به کار رفته را به اثبات رساند.

۲-۷- طراحی و ساخت مدار هیدروپنوماتیک آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد واحد جداساز هوا از روغن

به منظور اعتبارسنجی تجربی نتایج شبیه‌سازی عددی عملکرد سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، یک مدار هیدروپنوماتیک آزمایشگاهی مطابق با طرح‌واره‌ی ارائه‌شده در شکل (۵)، طراحی و پیاده‌سازی شد. این مدار امکان کنترل مستقل و دقیق متغیرهای اصلی جریان، شامل فشار، دبی و میزان هوای تزریقی به روغن را فراهم می‌سازد.



الف طرح‌واره‌ی مدار هیدروپنوماتیک



ب نمای ظاهری مدار هیدروپنوماتیک

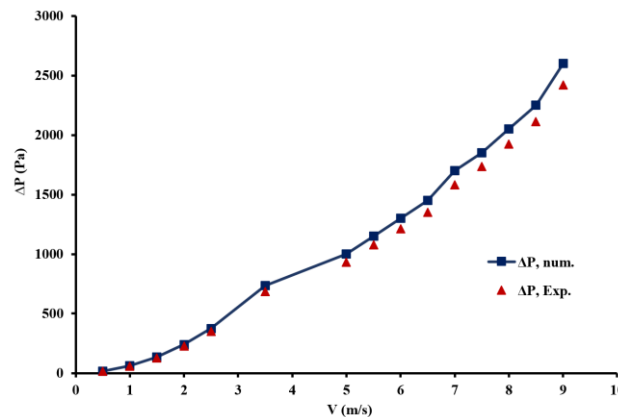
شکل ۵ مدار هیدروپنوماتیک آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی

مطابق شکل (۵)، روغن مورد نیاز مدار هیدروپنوماتیک توسط یک پمپ دنده‌ای با جابجایی ثابت (مدل X2P5102 از شرکت ویوویل) تامین می‌شود که توسط یک الکتروموتور الکتریکی به حرکت درمی‌آید. فشار روغن خروجی پمپ به وسیله‌ی یک سوپاپ فشارشکن تناسبی (مدل EDG-01-H از شرکت ترک هیدرولیک) تنظیم می‌شود. ارسال جریان روغن به سامانه‌ی جداساز هوا، از طریق یک شیر کنترل جهت چهاردهانه‌ی سه‌وضعیتی سولنوئیدی (مدل D1VW001 از شرکت پارکر) انجام می‌گیرد. بدین ترتیب، با تغییر وضعیت شیر کنترل جهت، امکان هدایت یا قطع جریان ورودی به سامانه‌ی جداساز هوا از روغن فراهم می‌شود. به منظور تنظیم و تثبیت دبی روغن ورودی به سامانه‌ی جداساز، مستقل از تغییرات فشار، یک سوپاپ کنترل جریان مجهز به جبران‌کننده‌ی فشار (مدل FGF2PKC3 از شرکت پارکر)، در مسیر جریان، قرار داده شده است. این تجهیز، مطابق با طرح‌واره‌ی نشان داده شده در شکل (۵)، امکان کنترل دقیق سرعت جریان روغن ورودی به جداکننده را فراهم کرده

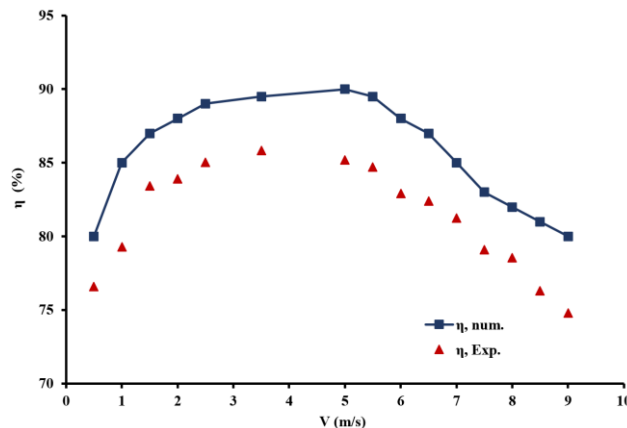
و شرایط تکرارپذیری آزمایش را تضمین می‌کند. برای تزریق هوای فشرده به روغن هیدرولیکی، از یک واحد تهیه، تولید و توزیع هوای فشرده (مدل ۲۵-۲۰۰ از شرکت پروفی‌مستر) استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، تزریق هوا در مجرای مکش پمپ هیدرولیکی صورت می‌گیرد. تنظیم حجم هوای تزریقی به روغن در مجرای مکش پمپ هیدرولیکی، با به‌کارگیری یک سوپاپ کنترل جریان (مدل 821-200-003 شرکت بوش) و یک تنظیم‌کننده فشار مستقل در بالادست آن (مدل 821-302-400 شرکت بوش) انجام می‌شود. این پیکربندی، امکان کنترل دقیق نسبت هوای ورودی به روغن و ایجاد شرایط مختلف جریان دوفازی را فراهم می‌سازد. به‌منظور پایش کمیت‌های کلیدی مدار هیدروپنوماتیک، فشار و دبی روغن در مجاری ورودی و خروجی سامانه‌ی جداساز (نقاط مشخص شده با P و Q در شکل (۵)) اندازه‌گیری شدند. فشار و دمای روغن توسط حسگرهای مدل SCPT-400 با دقت $\pm 0.5\%$ درصد از مقیاس کامل، و دبی جریان عبوری توسط حسگرهای مدل SCFT-060 با دقت $\pm 1\%$ درصد از مقدار خوانده‌شده ثبت گردید. سیگنال‌های خروجی کلیه‌ی حسگرها به واحد داده‌برداری و نمایش‌گر (مدل SCM600 از شرکت پارکر) منتقل شده و داده‌ها به‌صورت برخط ذخیره گردیدند. بدین ترتیب، مدار هیدروپنوماتیک نشان‌داده‌شده در شکل (۵)، با بهره‌گیری از تجهیزات اندازه‌گیری کالیبره‌شده و کنترل دقیق شرایط آزمایش، بستر مناسبی برای مقایسه کمی و معتبر میان پیش‌بینی‌های عددی و نتایج تجربی فراهم می‌کند.

۲-۸- ارزیابی و اعتبارسنجی مدل عددی

در این بخش، به منظور ارزیابی دقت و اعتبار مدل عددی توسعه‌یافته، نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های آزمایشگاهی کسب‌شده از سامانه‌ی جداساز واقعی مقایسه شده است. در شکل (۶)، نتایج حاصل از تحلیل عددی جریان عبوری از سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی و همچنین، نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی، برای دو کمیت کاربردی راندمان جداسازی (η) و افت فشار (ΔP)، برای دامنه‌ی سرعت‌های ورودی مخلوط هوا-روغن، ارائه گردیده‌اند.



الف افت فشار



ب راندمان جداسازی

شکل ۶ مقایسه نتایج عددی و تجربی راندمان جداسازی (η) و افت فشار (ΔP) در دامنه‌ی سرعت‌های ورودی

مقایسه‌ی نتایج عددی و داده‌های تجربی نشان می‌دهد که مقادیر تجربی راندمان جداسازی (η) و افت فشار (ΔP)، در تمام گستره‌ی سرعت مخلوط هوا-روغن ورودی، کمتر از مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل عددی هستند. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که به‌طور متوسط، اختلاف میان نتایج عددی و تجربی، برای راندمان جداسازی، در بازه‌ی ۴ تا ۵ درصد (به‌طور متوسط، ۵/۲ درصد)، و برای افت فشار، در بازه‌ی ۶ تا ۷ درصد (به‌طور متوسط، ۶/۵ درصد)، قرار دارد. این سطح از اختلاف، نه‌تنها در محدوده‌ی قابل قبول برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی قرار می‌گیرد، بلکه با گزارش‌های ارائه‌شده، در مطالعات پیشین بر روی جداسازهای گاز-مایع نیز هم‌خوانی دارد. در مطالعات عددی-تجربی لی و همکاران [۱۳]، و همچنین، ژانگ [۹]، اختلافی در حدود ۳ تا ۶ درصد برای راندمان و ۵ تا ۱۰ درصد برای افت فشار گزارش شده است. همچنین سایوریادی و همکاران نشان دادند که مدل‌های عددی مبتنی بر فرضیات ایده‌آل، عموماً افت فشار و راندمان را اندکی بیش‌برآورد می‌کنند [۷]. از این رو، اختلاف مشاهده‌شده در پژوهش حاضر، از نظر آماری و فیزیکی، قابل قبول به نظر می‌رسد. از دیدگاه فیزیکی، چند عامل اصلی در ایجاد این اختلاف نقش دارند که در زیر به آنها اشاره می‌شود:

- ایده‌آل‌سازی شرایط مرزی و هندسه در مدل عددی. در شبیه‌سازی عددی، دیواره‌های داخلی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، صاف و بدون زبری فرض می‌شوند و اثرات ناشی از ناهم‌محوری، خطاهای ساخت و لقی‌های مورد نیاز برای برهم‌بندی اجزای آن، لحاظ نمی‌گردد. در حالی که در سامانه‌ی آزمایشگاهی، زبری دیواره و ناصافی‌های موضعی موجب افزایش اتلاف انرژی، تضعیف میدان گردابی و در نتیجه، کاهش راندمان مؤثر جداسازی می‌شود. این موضوع در مطالعات وانگ و همکاران نیز به‌عنوان یکی از دلایل اصلی اختلاف نتایج عددی و تجربی ذکر شده است [۶].

- پدیده‌ی بازپخش ذرات روغن: این پدیده، در آزمایش‌های واقعی نقش مهمی ایفا می‌کند. در سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، بخشی از قطرات جداشده‌ی روغن ممکن است در اثر نوسانات فشار و آشفتگی مجدد، وارد جریان مرکزی شوند و همراه با فاز گازی از خروجی بالا خارج گردند. از این رو، بازپخش ذرات روغن، به‌طور معمول، در مدل‌های عددی به‌صورت ساده‌شده مدل‌سازی می‌شود یا به‌طور کامل نادیده گرفته می‌شود، که منجر به بیش‌برآورد راندمان عددی می‌گردد. بای و همکاران نیز گزارش کرده‌اند که لحاظ نکردن پدیده‌ی بازپخش ذرات مایع در جداسازهای گاز-مایع، یکی از منابع اصلی اختلاف بین نتایج عددی و تجربی است [۸].

- محدودیت‌های ابزار اندازه‌گیری آزمایشگاهی: حسگرهای فشار، دبی و روش‌های تعیین راندمان جداسازی، همواره دارای عدم قطعیت ذاتی هستند. حتی با کالیبراسیون دقیق، خطای اندازه‌گیری در محدوده‌ی ۲ تا ۵ درصد امری رایج است. این عدم قطعیت، به‌ویژه در سرعت‌های بالاتر مخلوط ورودی و افت فشارهای بالا، تأثیر نسبی بیشتری بر نتایج تجربی دارد.

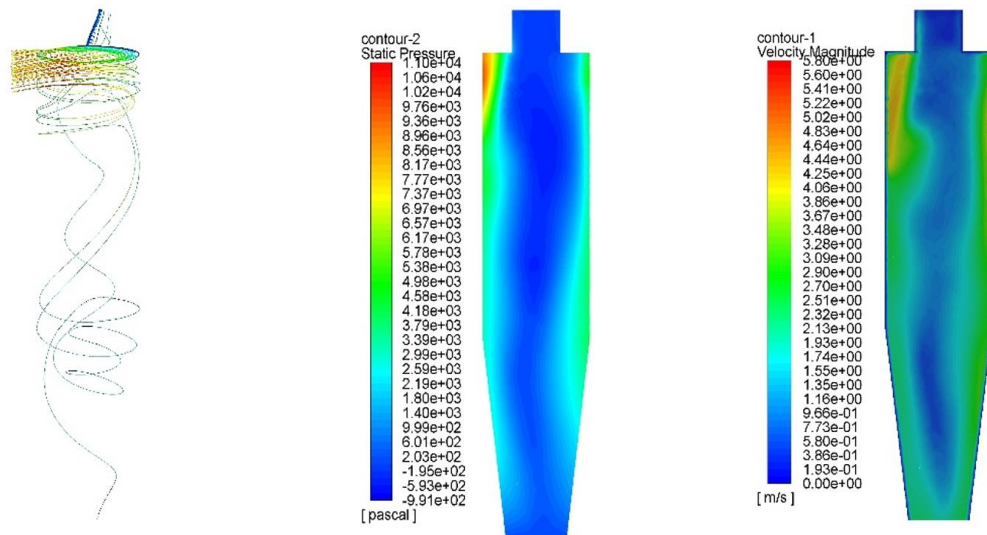
- مدل‌سازی ساده‌شده فاز پراکنده در شبیه‌سازی عددی: در بسیاری از مدل‌های عددی، توزیع اندازه‌ی قطرات روغن به‌صورت تک‌قطری یا با توزیع محدود در نظر گرفته می‌شود و برهم‌کنش قطره-قطره و پدیده‌های ادغام و خردشدگی به‌طور کامل بازنمایی نمی‌شوند. در مقابل، در سامانه‌ی واقعی، طیف وسیعی از اندازه‌ی قطرات وجود دارد که رفتار اینرسی متفاوتی از خود نشان می‌دهند و می‌توانند منجر به کاهش راندمان تجربی شوند. این موضوع، در مطالعات شی و همکاران نیز گزارش شده است [۱۴].

در مجموع، تطابق کیفی و کمی مناسب میان روندهای عددی و تجربی، همراه با اختلاف میانگین محدود (نزدیک به ۵ درصد برای راندمان و کمتر از ۷ درصد برای افت فشار)، نشان‌دهنده‌ی اعتبار قابل قبول مدل عددی توسعه‌یافته در این پژوهش است. علاوه بر این، هم‌خوانی این سطح اختلاف با نتایج گزارش‌شده در ادبیات موضوع، تأیید می‌کند که مدل عددی حاضر قادر است رفتار هیدرودینامیکی و عملکرد سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند و می‌تواند به‌عنوان ابزاری معتبر برای تحلیل وابسته به کمیت‌ها و بهینه‌سازی هندسی مورد استفاده قرار گیرد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر سرعت سیال ورودی بر عملکرد واحد جداساز هوا-روغن

در شکل‌های (۷) و (۸)، نقشه‌های هم‌مقدار (کانتور) سرعت و فشار مخلوط هوا-روغن، به‌همراه الگوی خروج ذرات هوا، برای سرعت‌های ورودی ۵ و ۷ متر بر ثانیه ارائه شده‌اند. در این مرحله، از شبیه‌سازی عددی جریان در سامانه‌ی جداسازی، قطر بخش استوانه‌ای (D_C)، قطر ورودی (D_i)، قطر خروجی روغن (D_o)، قطر خروجی هوا (D_a)، و زاویه‌ی مخروطی (θ)، به‌ترتیب، ۴۰ mm، ۲۲/۸mm، ۱۵/۷mm، ۱۸mm و ۷ درجه، در نظر گرفته شده است.

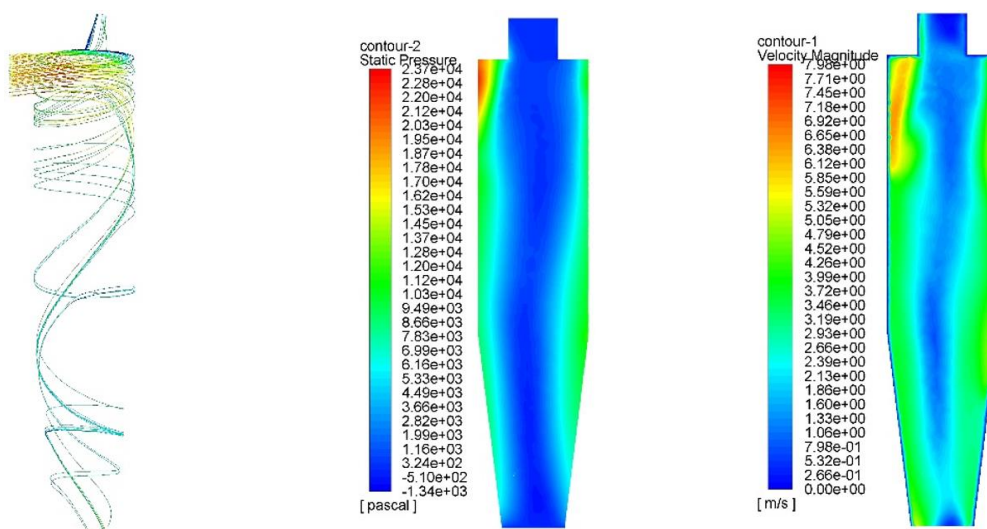


ج روند خروج ذرات هوا

ب نقشه‌ی هم‌مقدار فشار

الف نقشه‌ی هم‌مقدار سرعت

شکل ۷ عملکرد سامانه‌ی جداساز هوا از روغن تحت تأثیر مخلوط ورودی با سرعت ۵ m/s



ج روند خروج ذرات هوا

ب نقشه‌ی هم‌مقدار فشار

الف نقشه‌ی هم‌مقدار سرعت

شکل ۸ عملکرد سامانه‌ی جداساز هوا از روغن تحت تأثیر مخلوط ورودی با سرعت ۷ m/s

بر اساس شکل‌های (۷) و (۸)، مخلوط هوا-روغن، پس از ورود به محفظه‌ی سامانه‌ی جداساز، میدان گردابه‌ای شدیدی ایجاد می‌کند که تا انتهای بخش مخروطی گسترش می‌یابد. در اثر کاهش تدریجی قطر سامانه‌ی جداساز هوا در بخش

مخروطی، سرعت چرخشی جریان افزایش یافته و بر اساس اصل بقای اندازه‌ی حرکت زاویه‌ای، ناحیه‌ای با فشار پایین در مرکز جریان تشکیل می‌شود. همین گرادیان فشار در سامانه‌ی جداساز هوا، موجب شکل‌گیری یک جریان برگشتی در محور مرکزی، تحت عنوان، گردابه‌ی ثانویه می‌گردد. این جریان برگشتی، برخلاف جریان چرخشی غالب، به دلیل استقرار ناحیه‌ی کم‌فشار در محور هندسی جداساز، به سمت بالا حرکت می‌کند و بدین ترتیب، امکان خروج فاز سبک فراهم می‌شود. از آنجایی که، چگالی هوا کمتر از روغن است، نیروی گریز از مرکز، موجب رانده شدن روغن به سمت دیواره‌ها و ماندن هوا در ناحیه‌ی مرکزی می‌گردد. بر این اساس، فاز هوا در امتداد محور، به وسیله‌ی جریان برگشتی (گردابه‌ی ثانویه)، به سمت خروجی هوا منتقل می‌شود. این ساز و کار جدایش، شکل‌گیری یک ناحیه‌ی کم‌سرعت و کم‌فشار، در محور سامانه‌ی جداساز را نیز به دنبال دارد. ضخامت این ناحیه، در نزدیکی مجرای ورودی، بیشترین مقدار را دارد و با حرکت در راستای محور، به سمت مجرای خروجی روغن، به تدریج کاهش می‌یابد. مسیر ذرات هوا در شکل‌های (۷) و (۸) نیز، این رفتار را تأیید کرده و نشان می‌دهد که جریان هوا پس از ورود به بخش مخروطی، تحت تأثیر گرادیان فشار، تغییر جهت داده و به سمت خروجی بالایی هدایت می‌شود. از سوی دیگر، نقشه‌های هم‌مقدار فشار در سامانه‌ی جداساز هوا، به وضوح تشکیل یک هسته‌ی کم‌فشار در امتداد محور را نشان می‌دهند؛ ساختاری که نقش مهمی در هدایت فاز گازی به سمت خروجی بالایی و تمرکز فاز مایع در نواحی پایین دست ایفا می‌کند. این الگوی توزیع فشار با گزارش‌های ارائه‌شده توسط باروا و همکاران نیز مطابقت دارد [۱۵]. علاوه بر این، تحلیل میدان جریان، شکل‌گیری هسته‌ی گردابه، و وجود یک ناحیه‌ی کم‌سرعت محوری، را تأیید می‌کند؛ پدیده‌ای که با سازوکار جریان برگشتی داخلی در مطالعات پیشین همخوان است [۱۸].

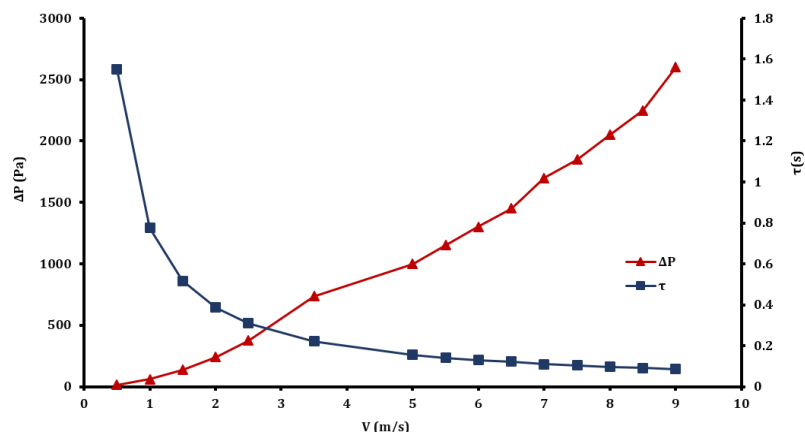
شکل (۹)، توزیع افت فشار و زمان ماند ذرات هوا را در سرعت‌های ورودی مختلف جریان ورودی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت ورودی، افت فشار (ΔP)، به‌طور یکنواخت و شتاب‌دار افزایش یافته، در حالی که زمان ماند (T)، با کاهش همراه می‌گردد. این رفتار با اصول هیدرودینامیک جریان‌های چرخشی و نتایج مطالعات سیون و همکاران، هم‌خوانی دارد [۴]. افزایش سرعت ورودی مخلوط هوا-روغن، موجب تقویت ساختار گردابه، تشدید گرادیان شعاعی فشار و افزایش آشفتگی در نواحی ورودی و مجاور دیواره می‌شود، که به تبع آن، اتلاف انرژی نیز افزایش می‌یابد. داده‌های شکل (۹) نشان می‌دهد که افت فشار، از حدود $Pa\ 15$ در سرعت $0.5\ m/s$ ، به حدود $Pa\ 2600$ ، در سرعت $9\ m/s$ می‌رسد. رفتاری که با روابط توان‌نما ($\Delta P \propto V^n$) گزارش‌شده توسط ژانگ در سال ۲۰۲۲، مطابقت دارد [۹]. به‌طور مشخص، روند تغییرات افت فشار در این سامانه‌ی جداساز هوا، بر حسب سرعت جریان ورودی، به صورت رابطه‌ی (۸)، بیان می‌گردد:

$$\Delta P [Pa] \approx 63.08 V^{1.712} \quad (8)$$

در مقابل، افزایش شدت میدان چرخشی و نیروی گریز از مرکز در سرعت‌های بالاتر، موجب تسریع جداسازی فازها و کاهش قابل‌توجه زمان ماند ذرات می‌شود؛ به‌طوری که، از حدود $1/55\ s$ در سرعت $0.5\ m/s$ ، به حدود $0.086\ s$ ، در سرعت $9\ m/s$ ، کاهش می‌یابد. این روند با رابطه‌ی تقریبی زیر تعریف می‌گردد:

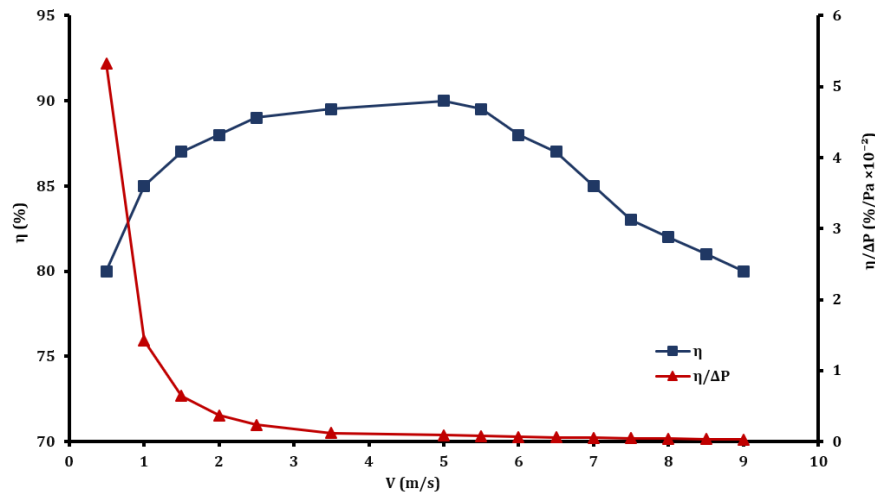
$$\tau \approx 0.775 V^{-0.999} \quad (9)$$

افزایش تنش‌های هیدرودینامیکی، افت فشار را افزایش می‌دهد. هم‌زمان، تقویت میدان چرخشی، زمان ماند را کاهش می‌دهد. این رفتار دوگانه نشان می‌دهد که کاهش زمان ماند، با افزایش قابل‌توجه افت فشار، در سامانه‌ی جداساز هوا، همراه است. این مشاهدات، با یافته‌های پژوهش سایوریدی در سال ۲۰۲۴، مطابقت دارد [۷]. او دریافت که، افزایش سرعت جریان، تنها تا حدی مطلوب است که کاهش زمان ماند، بتواند افزایش نامتناسب افت فشار و مصرف انرژی بیشتر را توجیه کند.



شکل ۹ روند تغییرات افت فشار و زمان ماند در سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی در سرعت‌های ورودی مختلف

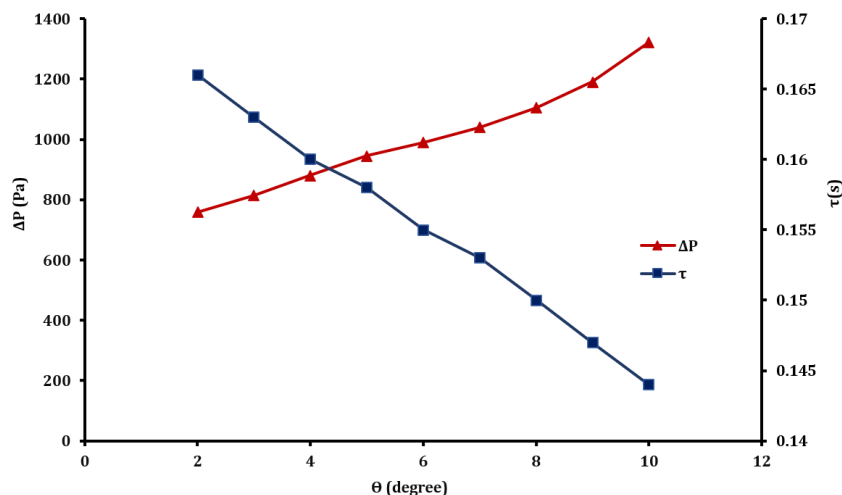
شکل (۱۰)، نیز روند تغییرات راندمان سامانه‌ی جداساز و کمیت نسبت راندمان به افت فشار ($\eta/\Delta P$)، را بر حسب سرعت‌های مختلف ورودی جریان نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که راندمان جداسازی نسبت به سرعت ورودی رفتاری غیرخطی دارد که ناشی از برهم‌کنش دو ساز و کار متضاد است. در سرعت‌های پایین، افزایش سرعت، موجب تقویت نیروی گریز از مرکز و میدان گردابی شده و انتقال شعاعی قطرات روغن به دیواره را تسهیل می‌کند؛ در نتیجه راندمان از ۷۹/۶٪ در 0.5 m/s ، به مقدار بیشینه ۹۱٪ در 5 m/s می‌رسد. این بهبود با گزارش‌های پیشین درباره جداسازهای گاز-مایع سازگار است و نشان می‌دهد که افزایش انرژی جریان در این بازه، به‌طور مستقیم، فرآیند جداسازی را تقویت می‌کند [۷ و ۹]. با این حال، در سرعت‌های بالاتر، سازوکارهای مخرب بر روند جداسازی هوا از روغن غلبه می‌کنند. افزایش سرعت مخلوط ورودی، باعث افزایش تلاطم، خردشدگی قطرات و کاهش زمان ماند، می‌شود؛ شرایطی که تشکیل ذرات کوچک‌تر با اینرسی کمتر را به‌همراه دارد و احتمال همراهی آن‌ها با جریان هوا را افزایش می‌دهد. این پدیده سبب می‌شود قطرات ریزشده نتوانند تحت اثر نیروی گریز از مرکز به دیواره منتقل شوند و توسط گردابه داخلی به سمت خروجی هوا کشیده شوند. در نتیجه، پس از نقطه‌ی بهینه، راندمان سامانه‌ی جداساز هوا از روغن، کاهش یافته و از ۹۱٪ در سرعت 5 m/s ، به 80.3% در سرعت 9 m/s می‌رسد. این رفتار، با عنوان، نقطه‌ی شکست عملکردی، شناخته می‌شود، به‌طور گسترده در مطالعات تجربی و عددی نیز گزارش شده است [۵]. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که، بیشینه راندمان سامانه‌ی جداساز، اغلب در سرعت‌های متوسط رخ می‌دهد؛ محدوده‌ای که وابستگی مستقیم به شکل و هندسه‌ی آن دارد [۱۵]. مطابق شکل (۱۰)، بیشینه شاخص راندمان به‌ازای واحد افت فشار ($\eta/\Delta P$) در سرعت 0.5 متر بر ثانیه، به مقدار $5/33$ ، به‌دست می‌آید. این شاخص، با افزایش سرعت ورودی مخلوط هوا و روغن، به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. این کاهش نشان می‌دهد که نقطه بیشینه راندمان (۹۱٪)، لزوماً با نقطه بهینه عملکرد، از منظر فنی-اقتصادی هم‌پوشانی ندارد و سرعت‌های پایین‌تر، بهره‌وری انرژی بیشتری فراهم می‌کنند. لازم به ذکر است که جداساز هوا-روغن در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، یک تجهیز جانبی محسوب می‌شود و افت فشار ناشی از آن، در مقایسه با افت ایجادشده توسط اجزایی همچون سوپاپ‌ها، اتصالات، لوله‌ها و فیلترها، بسیار ناچیز است. بنابراین، افت فشار در این سامانه، تأثیر محسوسی بر انتخاب پمپ ندارد. با وجود این، بهره‌گیری از رویکرد چندمعیاره در طراحی سیکلون‌های مدرن، ضروری ارزیابی می‌شود. بر اساس نتایج حاضر، به منظور ایجاد توازن میان دو کمیت راندمان (۹۰-۸۷ درصد) و افت فشار (۱۱۵۰-۷۳۵ پاسکال)، محدوده‌ی سرعت بهینه جریان ورودی به سامانه‌ی جداساز هوا-روغن، $3/5$ تا $5/5$ متر بر ثانیه، تعیین می‌گردد (بهترین عملکرد سامانه).



شکل ۱۰ روند تغییرات راندمان (η) و شاخص راندمان به ازای واحد افت فشار ($\eta/\Delta P$) در واحد جداساز هوا از روغن هیدرولیکی در سرعت‌های ورودی مختلف

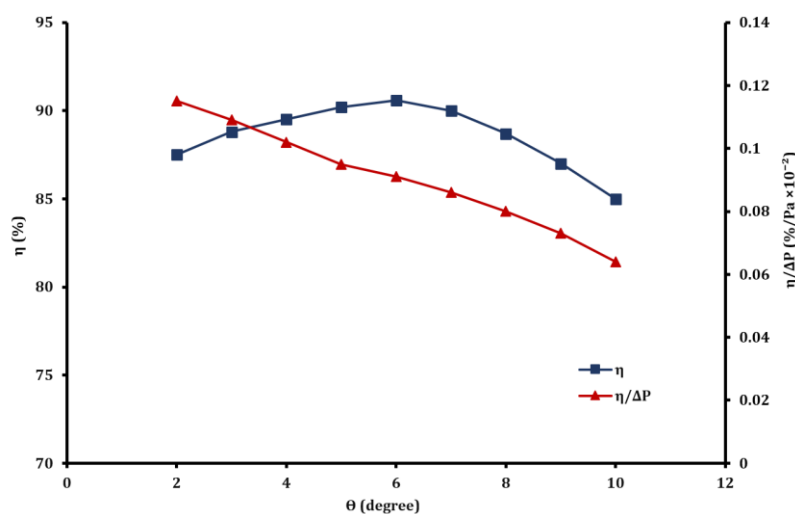
۳-۲- تأثیر شیب بخش مخروط بر عملکرد واحد جداساز هوا-روغن

شکل (۱۱)، تغییرات افت فشار (ΔP) و زمان ماند ذرات هوا (τ)، در سامانه‌ی جداساز هوا-روغن را بر حسب شیب‌های مختلف بخش مخروطی نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱۱)، تغییر شیب بخش مخروطی (θ)، سامانه‌ی جداساز هوا-روغن، موجب تغییرات مشخصی در افت فشار و زمان ماند ذرات هوا، می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شیب بخش مخروطی سامانه‌ی جداساز هوا-روغن، افت فشار، به‌طور پیوسته و غیرخطی، افزایش می‌یابد. مقدار آن از حدود $Pa 900$ ، در شیب ۳-۴ درجه‌ای بخش مخروطی سامانه‌ی جداساز هوا، به بیش از $Pa 1700$ ، در شیب ۱۰-۱۲ درجه‌ای آن می‌رسد. این افزایش در افت فشار، ناشی از کاهش قطر قاعده‌ی کوچک بخش مخروطی، یا مجرای خروجی روغن، در سامانه‌ی جداساز و در نتیجه‌ی آن، افزایش مقاومت در برابر جریان مخلوط عبوری است. بدین ترتیب، کاهش قطر مجرای خروجی سامانه‌ی جداساز هوا، ضمن افزایش سرعت محوری جریان عبوری، موجب اتلاف بیشتر انرژی جنبشی چرخشی جریان گردابی، و در نهایت، رشد افت فشار می‌گردد. این روند، با مشاهدات گزارش شده در جداسازهای گاز-مایع و گاز-جامد، همخوانی کامل دارد [۱۳ و ۱۷]. از سوی دیگر، مطابق شکل (۱۱)، زمان ماند ذرات هوا (τ) در سامانه‌ی جداساز هوا-روغن، با افزایش شیب بخش مخروطی آن، به‌صورت غیرخطی، کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج، زمان ماند ذرات هوا، با افزایش شیب بخش مخروطی سامانه‌ی جداساز هوا از 3° به 10° ، از 0.19 ثانیه، به 0.11 ثانیه، کاهش می‌یابد. در این میان، محدوده بهینه $5^\circ-6^\circ$ ، با زمان ماند 0.155 ثانیه، نقطه تعادلی محسوب می‌شود که در آن سرعت خروج جریان برای جداسازی کافی به نظر می‌رسد. دلیل فیزیکی این کاهش، افزایش سرعت مارپیچی جریان، در اثر افزایش شیب بخش مخروطی سامانه‌ی جداساز هوا است که، منجر به خروج سریع‌تر فاز پراکنده (ذرات و حباب‌ها)، از سامانه می‌گردد. بر این اساس، در سامانه‌ی جداساز هوا با شیب بیشتر بخش مخروطی، فرصت لازم برای جداسازی کامل فازها، با محدودیت همراه می‌شود. با این حال، در محدوده‌ی شیب بهینه‌ی بخش مخروطی سامانه‌ی جداساز هوا، زمان ماند، همچنان برای جداسازی مؤثر کافی است. این روند، با مشاهدات تجربی و نتایج عددی، سایوریدی در جداسازهای گاز-مایع مطابقت دارد.



شکل ۱۱ روند تغییرات افت فشار (ΔP) و زمان ماند (τ) در واحد جداساز هوا از روغن هیدرولیکی بر حسب شیب بخش مخروطی آن

شکل (۱۲)، روند تغییرات راندمان جداسازی (η) را در شیب‌های مختلف بخش مخروطی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن، نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱۲)، با افزایش شیب بخش مخروطی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن، از ۳ درجه به ۶ درجه، راندمان به صورت غیرخطی، از حدود ۸۵٪ به ۸۹٪ افزایش می‌یابد. این بهبود عملکرد، به طور مستقیم به تقویت میدان گردابی داخلی و افزایش نیروی گریز از مرکز وارد بر قطرات روغن نسبت داده می‌شود که منجر به انتقال مؤثرتر آن‌ها به دیواره و کاهش همراهی هوا می‌گردد. از سوی دیگر، در محدوده‌ی ۵ تا ۶ درجه‌ای شیب بخش مخروطی، راندمان عملکرد سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، بیشینه است. در واقع، در این محدوده‌ی شیب بخش مخروطی سامانه‌ی جداساز هوا، یک تعادل دینامیکی میان نیروی گریز از مرکز، طول مسیر گردابه و زمان ماند کافی (۰/۱۵۵۵) برقرار می‌شود. با این حال، ادامه‌ی افزایش شیب بخش مخروطی سامانه‌ی جداساز هوا، فراتر از این نقطه بهینه، منجر به افت راندمان تا حدود ۸۶-۸۳ درصد، در شیب‌های ۱۰-۱۲ درجه می‌گردد. این کاهش ناشی از اثرات نامطلوب هندسی است. در واقع، کاهش قطر خروجی، سرعت محوری و تلاطم‌های داخلی را به شدت افزایش می‌دهد. این پدیده، نه تنها باعث خرد شدن قطرات روغن و ایجاد چالش برای جداسازی آن‌ها می‌شود، بلکه با افزایش همراهی هوا، کارایی کلی سامانه را تضعیف می‌کند [۴]. این رفتار دوگانه، که با یافته‌های سایوریدی در سال ۲۰۲۴ و بای در سال ۲۰۲۱، همخوانی دارد، تأکید می‌کند که شیب بخش مخروطی، یک کمیت کلیدی است که، اثرات متضاد و غیرخطی بر عملکرد جداسازی دارد.

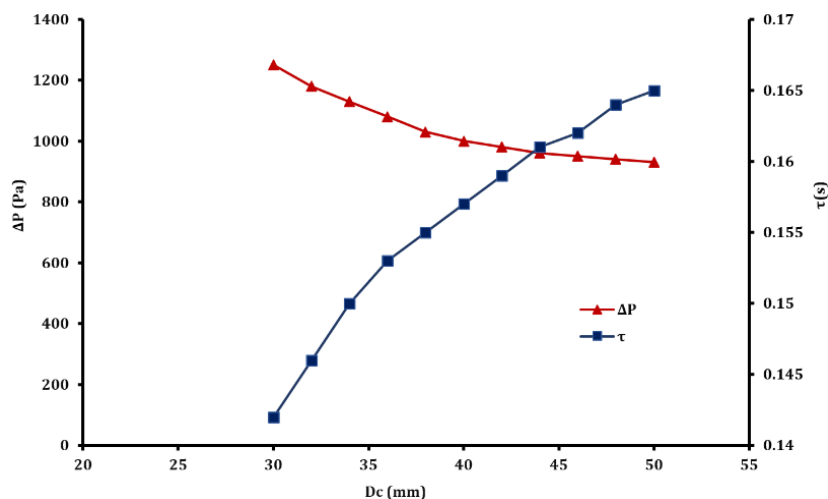


شکل (۱۲) تغییرات راندمان (η) و شاخص $\eta/\Delta P$ ، در واحد جداساز هوا از روغن هیدرولیکی بر حسب شیب بخش مخروطی آن

مطابق شکل (۱۲)، تحلیل شاخص عملکرد فنی-اقتصادی ($\eta/\Delta P$)، که نمایانگر نسبت بهره‌وری به مصرف انرژی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی است، نقطه بهینه را در شیب‌های ۵ تا ۶ درجه‌ای بخش مخروطی، نشان می‌دهد. این شاخص با افزایش زاویه فراتر از این محدوده، روندی نزولی را در پیش می‌گیرد. علت این پدیده در غلبه نرخ رشد افت فشار بر نرخ کاهش راندمان نهفته است؛ به طوری که هزینه انرژی لازم برای دستیابی به هر واحد بهره‌وری جداسازی، به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد. بنابراین، تعیین شیب بهینه بخش مخروطی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، یک فرآیند چندوجهی است که در آن موازنه‌ی میان بیشینه‌سازی کارایی و کمینه‌سازی مصرف انرژی، مد نظر قرار می‌گیرد. این یافته، نقش راهبردی شیب بخش مخروطی را به عنوان یک اهرم کلیدی برای دستیابی به عملکرد پایدار و اقتصادی در سامانه‌های جداسازی تأیید می‌کند و آن را از یک کمیت صرفاً هندسی به یک متغیر لازم برای تصمیم‌گیری عملیاتی و اقتصادی ارتقا می‌دهد. لازم به ذکر است که، شیب بهینه‌ی بخش مخروطی در سیکلون‌ها، یک کمیت ثابت نبوده و به شدت به نوع جریان و ویژگی‌های فیزیکی فازهای درگیر، وابسته است. این وابستگی به خوبی در مقایسه بین سامانه‌های مختلف مشهود است. در سیکلون‌های گاز-مایع، شیب بهینه‌ی بخش مخروطی، برای موازنه‌ی راندمان و افت فشار، برابر با ۱۰-۵ درجه می‌باشد [۷]. در مقابل، برای سیکلون‌های مایع-جامد که نیاز به رسوب ذرات سنگین وجود دارد، شیب‌های بزرگ‌تر (۱۵-۱۰ درجه)، برای افزایش زمان ماند ترجیح داده می‌شود [۱۱]. در حالی که، در سیکلون‌های گاز-جامد با ذرات سبک، شیب‌های کوچک‌تر (۸-۵ درجه)، برای ایجاد نیروی گریز از مرکز کافی، مؤثرترند [۱۵]. در این چارچوب، مطالعه‌ی حاضر با تمرکز بر یک جداساز هوا-روغن، تحت شرایط عملیاتی مشخص (گرانروی روغن: $46cSt$ ، دمای روغن: $40^{\circ}C$ ، سرعت ورودی مخلوط: ۵ متر بر ثانیه)، شیب بهینه‌ی بخش مخروطی، در محدوده‌ی ۶-۵ درجه، تعیین می‌گردد. بر این اساس، نتایج نشان می‌دهد که، شیب بهینه برای بخش مخروطی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، تعادلی مطلوب، میان مشخصه‌های عملکردی برقرار می‌سازد. این شیب بهینه، راندمان جداسازی بالایی (حدود ۸۹ درصد) را در کنار افت متوسط (در حدود $1100-1000 Pa$)، و زمان ماند مناسب (حدود ۰/۱۵۵ ثانیه)، برقرار می‌سازد. این یافته با نتایج مطالعات عددی و تجربی اخیر در این حوزه، از جمله پژوهش سایوریادی در سال ۲۰۲۴ و بای و همکاران در سال ۲۰۲۱، همخوانی دارد [۷ و ۸].

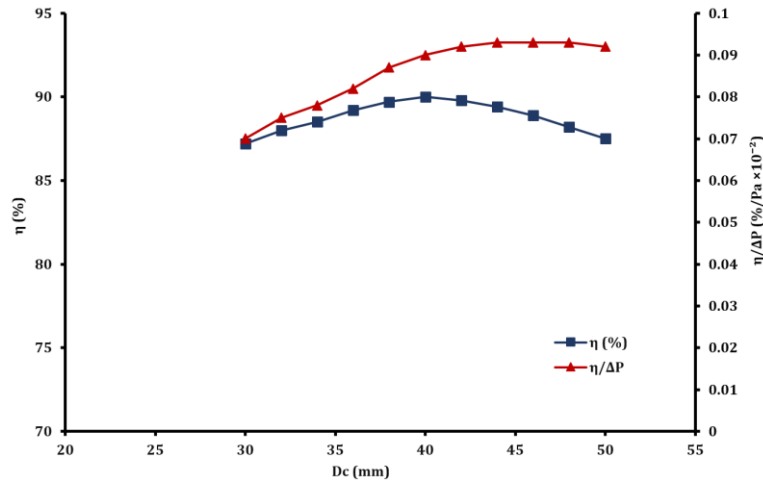
۳-۳- تأثیر قطر بخش استوانه‌ای بر عملکرد واحد جداساز هوا-روغن

شکل (۱۳)، تأثیر قطر بخش استوانه‌ای بر دو مشخصه‌ی عملکردی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، شامل، افت فشار (ΔP) و زمان ماند (T)، را به تصویر می‌کشد. بر اساس نتایج، افت فشار با افزایش قطر استوانه، یک روند کاهشی، غیرخطی را دنبال می‌کند؛ به طوری که از $1250 Pa$ در قطر $30 mm$ به $1000 Pa$ در $40 mm$ ، و در نهایت، به $930 Pa$ در قطر $50 mm$ می‌رسد. علت اصلی این پدیده، کاهش مقاومت در برابر جریان مخلوط هوا-روغن و تضعیف تدریجی انرژی گردابه است. این یافته، با نتایج مطالعات تجربی اخیر بر روی سیکلون‌های گاز-مایع که نشان می‌دهد افزایش مقطع عرضی استوانه‌ای، جریان را یکنواخت‌تر کرده و افت انرژی سیال را کاهش می‌دهد، مطابقت دارد [۷]. در مقابل، زمان ماند (T)، با افزایش قطر بخش استوانه‌ای سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، افزایش می‌یابد. این مشخصه‌ی عملکردی، از $0/142$ ثانیه در قطر $30 mm$ به $0/157$ ثانیه در $40 mm$ ، و $0/165$ ثانیه در $50 mm$ ارتقا می‌یابد. این افزایش به دلیل بزرگ‌تر شدن حجم کنترل و طولانی‌تر شدن مسیر جریان است که به ذرات هوا فرصت بیشتری برای حرکت شعاعی و جداسازی از فاز پیوسته می‌دهد، بدون آنکه سرعت جریان مرکزی به میزان قابل توجهی کاهش یابد. روند ملایم و غیرخطی افزایش زمان ماند با اصول بنیادین هیدرودینامیک جریان‌های گردابی سازگار است. با این حال، تحلیل نشان می‌دهد که افزایش قطر فراتر از $40 mm$ ، مزیت قابل توجهی در زمان ماند ایجاد نمی‌کند. در قطرهای بزرگ‌تر بخش استوانه‌ای سامانه‌ی جداساز هوا از روغن، انرژی گردابه به شدت تضعیف شده و در نتیجه‌ی آن، سرعت جریان محوری کاهش می‌یابد. این شرایط می‌تواند مانع از جداسازی کارآمد ذرات هوا از روغن شده و عملکرد کلی سامانه را تحت تأثیر قرار دهد.



شکل ۱۳ تأثیر قطر بخش استوانه‌ای بر روند تغییرات افت فشار (ΔP) و زمان ماند (τ)، در واحد جداساز هوا از روغن هیدرولیکی

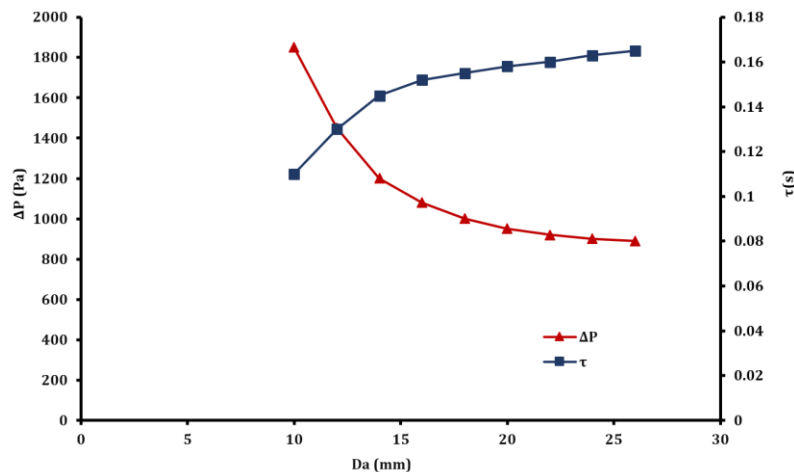
شکل (۱۴)، تحلیلی جامع، از تأثیر قطر بخش استوانه‌ای (D_c) سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، بر دو شاخص عملکردی آن، شامل راندمان جداسازی (η) و شاخص فنی-اقتصادی $\eta/\Delta P$ ، ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج، با افزایش قطر از ۳۰ به ۴۰ mm، راندمان جداسازی یک افزایش چشمگیری را تجربه می‌کند و از ۸۸٪ به بیشینه‌ی ۹۰٪ می‌رسد. این بهبود عملکرد، منطبق بر اصول فیزیکی، ناشی از تقویت نیروی گریز از مرکز و افزایش حجم کنترل در بخش استوانه‌ای است که انتقال شعاعی روغن، به دیواره را تسهیل می‌کند [۱۵]. با این حال، فراتر از نقطه‌ی بهینه (۴۰ میلی‌متر)، راندمان جداسازی، با یک روند کاهشی جزئی، به ۸۷٪ در قطر ۵۰ mm، می‌رسد. علت این کاهش را می‌توان تضعیف انرژی گردابه مرکزی و افت شدت جریان چرخشی دانست. در این شرایط، سرعت مماسی کافی برای جداسازی کامل ذرات ریز روغن فراهم نمی‌شود [۸]. تحلیل شاخص فنی-اقتصادی $\eta/\Delta P$ در سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، این یافته‌ها را تأیید و تکمیل می‌کند. این شاخص نیز در قطر ۴۰ mm، به بیشینه‌ی خود می‌رسد که نشان‌دهنده‌ی تحقق بهترین توازن میان راندمان بالای جداسازی و افت فشار (مصرف انرژی) پایین است. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که، پس از قطر بهینه‌ی ۴۰ mm، با وجود کاهش راندمان سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، شاخص $\eta/\Delta P$ تغییر محسوسی نمی‌کند. این پدیده حاکی از آن است که، کاهش اندک در راندمان سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، توسط کاهش چشمگیر در افت فشار (مصرف انرژی) جبران شده و شاخص فنی-اقتصادی را در سطح مطلوبی تثبیت می‌کند. در نتیجه، بر اساس تحلیل جامع داده‌ها، محدوده‌ی قطر ۳۶ تا ۴۰ mm، به عنوان نقطه‌ی بهینه برای بخش استوانه‌ای سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، شناسایی می‌شود. این محدوده نه تنها دستیابی به بیشینه راندمان و شاخص فنی-اقتصادی را به صورت همزمان تضمین می‌کند، بلکه با یافته‌های پژوهش‌های پیشین در حوزه‌ی جداسازهای گاز-مایع، که روند غیرخطی مشابهی را گزارش کرده‌اند، کاملاً همخوانی دارد [۹]. این موضوع بر اهمیت در نظر گرفتن تعامل پیچیده‌ی میان هندسه، انرژی جریان چرخشی و مشخصه‌های عملکردی، برای دستیابی به یک طراحی بهینه و کارآمد تأکید می‌ورزد.



شکل ۱۴ تأثیر قطر بخش استوانه‌ای بر راندمان (η) و شاخص فنی-اقتصادی $\eta/\Delta P$ در سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی

۳-۴- تأثیر قطر مجرای خروجی هوا بر عملکرد واحد جداساز هوا-روغن

شکل (۱۵)، تحلیلی جامع از تأثیر قطر مجرای خروجی هوا (D_a)، بر دو مشخصه‌ی عملکردی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، شامل، افت فشار (ΔP) و زمان ماند (T)، ارائه می‌دهد.

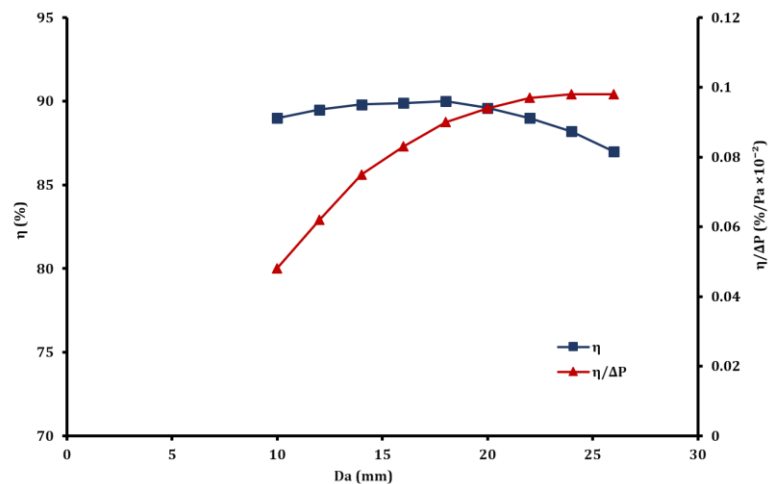


شکل ۱۵ تأثیر قطر مجرای خروجی هوا بر روند تغییرات افت فشار (ΔP) و زمان ماند (T)، در واحد جداساز هوا از روغن هیدرولیکی

مطابق شکل (۱۵)، نتایج حاکی از یک رابطه‌ی معکوس و غیرخطی میان قطر مجرا و افت فشار است؛ به طوری که با کاهش قطر از ۲۶ به ۱۰ میلی‌متر، افت فشار به شدت از ۸۵۰ به ۱۳۰۰ پاسکال افزایش می‌یابد. علت اصلی این پدیده، مقاومت جریان بالاتر در مجرای تنگ‌تر و نیاز به انرژی بیشتر برای عبور مخلوط هوا-روغن از سامانه‌ی جداساز است. ساز و کار فیزیکی این پدیده، افزایش مقاومت در برابر جریان و اتلاف انرژی بیشتر در مجرای خروجی تنگ‌تر است که نیازمند گرادیان فشار بالاتری برای دفع سیال می‌باشد. از سوی دیگر، قطرهای بزرگ‌تر مجرای خروجی در سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، به دلیل مسیر جریان وسیع‌تر و کاهش انرژی لازم برای هدایت مخلوط، افت فشار کمتری ایجاد می‌کنند. این یافته با اصول بنیادین دینامیک سیالات و نتایج مطالعات پیشین در این زمینه، همخوانی لازم را دارد [۱۲]. در مقابل، زمان ماند (T)، یک رابطه‌ی مستقیم و غیرخطی، با قطر مجرای خروجی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن، نشان می‌دهد و از ۰/۱۳۸ ثانیه در قطر ۱۰ میلی‌متر، به ۰/۱۶۵ ثانیه در قطر ۲۶ میلی‌متر ارتقا می‌یابد. این افزایش، به دلیل طولانی‌تر شدن مسیر جریان و کاهش متناظر

سرعت محوری در هسته‌ی مرکزی سامانه‌ی جداساز است. در نتیجه، زمان ماند طولانی‌تر، فرصت کافی برای انتقال شعاعی ذرات روغن تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز فراهم آورده و فرآیند جداسازی فاز گازی از فاز مایع را به طور مؤثر، بهبود می‌بخشد.

در شکل (۱۶)، تأثیر قطر مجرای خروجی هوا (D_a)، بر راندمان (η) و شاخص فنی-اقتصادی $\eta/\Delta P$ ، سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، ارائه شده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که عملکرد سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، وابستگی قابل توجهی به قطر مجرای خروجی آن دارد. این وابستگی از آن جهت اهمیت می‌یابد که قطر مجرای خروجی، یک رابطه‌ی دینامیکی، میان زمان ماند سیال و شدت جریان چرخشی برقرار می‌کند. مطابق بررسی‌های انجام‌شده، هنگامی که قطر مجرای خروجی برابر با ۱۸ میلی‌متر باشد، بیشینه راندمان سامانه (حدود ۹۰ درصد) حاصل می‌شود. در قطرهای کمتر از ۱۸ میلی‌متر، افزایش سرعت محوری موجب کاهش زمان ماند شده و در نتیجه، فرصت کافی برای جداسازی کامل ذرات روغن فراهم نمی‌شود. در مقابل، افزایش قطر مجرا، باعث کاهش شدت جریان چرخشی، و تضعیف نیروی گریز از مرکز می‌شود. تضعیف نیروی گریز از مرکز در سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی، انتقال شعاعی ذرات را مختل کرده و در نهایت، موجب افت راندمان آن، در قطرهای بزرگ‌تر مجرای خروجی می‌گردد [۸]. علاوه بر این، همانطور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود، شاخص فنی-اقتصادی $\eta/\Delta P$ نیز در قطر بهینه‌ی ۱۸ میلی‌متر به بیشینه‌ی مقدار ممکن می‌رسد که حاکی از تحقق بهترین توازن میان راندمان جداسازی و مصرف انرژی است. این یافته با اصول طراحی رایج در سیکلون‌های گاز-مایع همخوانی دارد که در آن، قطر مجرای خروجی به طور معمول در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد قطر بخش استوانه‌ای انتخاب می‌شود تا هم انرژی جریان چرخشی کافی حفظ شود و هم افت فشار در حد منطقی باقی بماند [۱۵]. بر این اساس، قطر بهینه‌ی ۱۸ میلی‌متر برای مجرای خروجی هوا در سامانه مورد مطالعه شناسایی شد. این قطر به صورت همزمان، شرایط لازم برای جداسازی مؤثر ذرات روغن، افت فشار منطقی و زمان ماند کافی برای انتقال شعاعی ذرات را فراهم می‌آورد. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که طراحی دقیق هندسه‌ی مجرای خروجی، با در نظر گرفتن تعامل میان انرژی جریان چرخشی، زمان ماند و نیروی گریز از مرکز، نقشی حیاتی در دستیابی به عملکرد بهینه سامانه‌ی جداساز هوا-روغن ایفا می‌کند.



شکل ۱۶ تأثیر قطر مجرای خروجی هوا (D_a) بر راندمان و شاخص $\eta/\Delta P$ در واحد جداساز هوا از روغن هیدرولیکی

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش، با هدف طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد یک واحد جداساز هوا-روغن، برای رفع چالش‌های ناشی از ورود هوا در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، انجام شد. تحقق هواگیری برخط این سامانه‌ها، انگیزه‌ی اصلی این تحقیق به‌شمار می‌رفت. در این راستا، یک مدل فیزیکی سازگار با شرایط کاری سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، طراحی و ساخته شد. همچنین، برای شبیه‌سازی دقیق میدان جریان آشفته و ساز و کارهای جداسازی، یک مدل عددی سه‌بعدی و دوفازی، با

ترکیب رویکردهای حجم سیال (VOF) و فاز گسسته (DPM)، توسعه یافت. اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی، با داده‌های تجربی دریافتی از مدار آزمایشگاهی، تطابق قابل قبولی را نشان داد. میانگین اختلاف برای راندمان جداسازی و افت فشار به ترتیب حدود ۵/۲ درصد و ۶/۵ درصد بود. این امر، اعتبار مدل عددی را برای تحلیل متغیرها در سامانه‌ی جداساز هوا-روغن تأیید می‌کند. بنابراین، این مدل، می‌تواند برای بررسی حساسیت سامانه‌ی جداساز هوا-روغن به کار رود. بررسی تأثیر سرعت ورودی نشان داد که راندمان جداسازی، رفتاری غیرخطی دارد. با افزایش سرعت تا ۵ متر بر ثانیه، راندمان جداسازی، به بیشینه‌ی ۹۱ درصد رسید، در حالی که، با ادامه‌ی افزایش سرعت ورودی مخلوط هوا-روغن، به دلیل تلاطم بیشتر و کاهش زمان ماند، روند نزولی پیدا کرد. تحلیل شاخص فنی-اقتصادی ($\eta/\Delta P$) و شرایط عملیاتی، محدوده‌ی سرعت بهینه‌ی ۳/۵ تا ۵/۵ متر بر ثانیه را برای دستیابی به توازن مطلوب میان راندمان بالا (۹۰-۸۷/۵ درصد) و افت فشار معقول (۷۳۵-۱۱۵۰ پاسکال)، مشخص نمود. تحلیل کمیت‌های هندسی حاکی از وجود نقاط بهینه برای هر کمیت بود. برای نمونه، شیب بخش مخروطی در بازه‌ی ۵ تا ۶ درجه، با ایجاد تعادل میان شدت گردابه و زمان ماند، بیشینه‌ی راندمان جداسازی (حدود ۸۹ درصد) را به همراه داشت. قطر بخش استوانه‌ای نیز در ۴۰ میلی‌متر به نقطه‌ی بهینه رسید که در آن، راندمان جداسازی، ۹۰ درصد و افت فشار، کمینه بود. فراتر از این مقدار، تضعیف گردابه، منجر به کاهش کارایی سامانه‌ی جداساز هوا از روغن هیدرولیکی شد. در نهایت، قطر مجرای خروجی هوا به عنوان یک متغیر کلیدی، در ۱۸ میلی‌متر (معادل ۴۵ درصد قطر استوانه)، بیشینه‌ی راندمان (حدود ۹۰ درصد) را فراهم آورد. این نتیجه، موازنه‌ی بهینه میان زمان ماند کافی و حفظ شدت جریان چرخشی را تأیید می‌کند. در مجموع، این تحقیق با پر کردن خلأ پژوهشی موجود در زمینه‌ی هواگیری برخط سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، چارچوبی عملی برای طراحی بهینه‌ی واحدهای جداساز هوا-روغن ارائه می‌دهد. بازه‌های بهینه‌ی پیشنهادی برای کمیت‌های هندسی (شیب بخش مخروطی: ۵-۶ درجه، قطر بخش استوانه‌ای: ۳۶-۴۰ میلی‌متر، قطر خروجی هوا: ۱۸ میلی‌متر) و شرایط عملیاتی، راهکاری نوین برای طراحی سامانه‌های جداساز هوا-روغن، با کارایی بالا و مصرف انرژی بهینه فراهم می‌آورد. پیاده‌سازی این رویکرد، در نهایت، منجر به ارتقای قابلیت اطمینان و عمر مفید سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی خواهد شد.

Authorship Contribution Statement

Majid Shokatzadeh



MSc. at Department of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

Conceptualization, Methodology, Validation, analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Pezhman Nikandish
Mohsen Ghasemi



Assistant Professor at Department of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

Conceptualization, Resources, Supervision, Project administration, Investigation

۵- مراجع

- [1] Nikandish P. Actuators and Hydrostatic Transmission Systems; Jundi-Shapur University of Technology, 2023.
- [2] He Q, Zhang L, Wang Y. Dynamic interaction between cavitation and valve motion in hydraulic systems. *Journal of Fluids and Structures*. 2025; 138: 104982.
- [3] Liu M, Wu D, Chen J. Design of a novel pump cavitation valve and study of its cavitation characteristics. *Water*. 2025; 17: 1503.

- [4] Seon G, Ahn J, Hwang W. Analysis of the impact of flow characteristics on the separation efficiency and pressure drop of a cyclone-type oil separator. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2022; 36: 273–283.
- [5] Silva A.R, Li D, On the bubble breakup dynamics in high-shear swirling flows within cyclonic separators. *Chemical Engineering Science*. 2023; 269:118646.
- [6] Wang C, Ma Y, Sui W. The secondary flows in cyclone separators: a comprehensive review. *Processes*. 2023;11: 2935.
- [7] Syuriadi A, Identifying the influence of inlet velocity changes on pressure drop and collecting efficiency in Stairmand and Lapple type cyclone separators. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2024; 4: 22-28.
- [8] Bai Y, Ji H, Liu Y, Li L, Yang S. Analysis of bubble flow mechanism and characteristics in gas–liquid cyclone separators. *Processes*. 2021; 9:123.
- [9] Zhang Z. Experimental study on the separation performance of a novel gas–liquid separator. *Separation and Purification Technology*. 2022; 289: 120736.
- [10] Chen J, Jiang Z.A, Chen J. Effect of inlet air volumetric flow rate on the performance of a two-stage cyclone separator. *ACS Omega*. 2018; 3: 13219–13226.
- [11] Kumar S, Banerjee C, Saha S. Effect of cone angle on the performance of hydrocyclones. *Powder Technology*. 2018; 335: 273–285.
- [12] Zhang P, Duan J, Chen G, Wang W. Numerical investigation of gas–solid flow characteristics in a circumfluent cyclone separator. *Advanced Powder Technology*. 2019; 30: 2221-2234.
- [13] Li C, Li Z, Zhang Y, Li B. Numerical simulation and experimental study of two-phase flow in a downhole spiral gas–liquid separator. *Frontiers in Earth Science*. 2023; 11: 1209743.
- [14] Xie X, Liu Y, Zhang H, Wang S. Investigation on the formation mechanism and flow characteristics of liquid carry-over in gas–liquid cyclone separators. *Physics of Fluids*. 2023; 35: 123317.
- [15] Barua S, Batcha M.F.M., Mohammed A.N, Saif Y, Al-Alimi S, Al-Fakih M.A.M, Zhou W. Numerical investigation of inlet height and width variations on separation performance and pressure drop of multi-inlet cyclone separators. *Processes*. 2024; 12:1820.
- [16] Chen S, Li D, Li J, Zhang Y, Wang X. Optimization design of hydrocyclone with overflow slit structure based on experimental investigation and numerical simulation analysis. *Scientific Reports*. 2024; 14: 18410.
- [17] Mao Y, Chertovskih R, Cai L. Numerical study of the gas–solid separation performance of axial flow cyclone separators. *Inventions*. 2024; 9: 34.