

Research Article**Study of Flow and Sediment in the labyrinth Channel of Pressure Compensating emitters Using Computational Fluid Dynamics (CFD)****Hossein Parvizi**^{1✉} | **Zohre Rafiei**² | **Hadis Hatami**³ | **Ali Momenpour**⁴

1. Corresponding Author, Department of Irrigation and Soil Physics, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Yazd, Iran.
2. M.Sc. Student, Department of Chemical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.
3. Department of Soil Chemistry and Plant Nutrition, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Yazd, Iran.
4. Department of Agronomy and Horticulture Department, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Yazd, Iran.

(✉ Corresponding Author: H.parvizi@areeo.ac.ir)**ARTICLE INFO****Received:** 18 May 2025**Revised:** 19 August 2025**Accepted:** 3 September 2025**Available Online:****HOW TO CITE THIS ARTICLE:**

Parvizi, H., Rafiei, Z., Hatami, H., Momenpour, A., (2025). Study of Flow and Sediment in the Labyrinth Channel of Pressure Compensating emitters Using Computational Fluid Dynamics (CFD). (In Persian with English abstract). Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research.V.26, No.99, P: 75-94

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.369512.1620>

Extended Abstract**Introduction**

Drip irrigation systems play a crucial role in water-efficient agricultural practices. However, clogging in emitters, particularly in labyrinth channels, significantly affects performance and longevity. The deposition of suspended particles within the flow path leads to reduced efficiency, necessitating precise analysis of flow behavior under different operating pressures and salinity conditions. While empirical studies provide valuable insights, computational fluid dynamics (CFD) has emerged as a powerful tool for simulating fluid flow and sedimentation in complex geometries, enabling cost-effective optimization of emitter designs.

Methodology

In this study, flow behavior and sediment deposition in pressure-compensating emitters with labyrinth channels were examined under various salinity and operating pressure conditions. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were performed using COMSOL software, and the results were compared with experimental data. Moreover, in our study the pressure-compensating emitters of three different brands - Netafim (8 and 25 L/h), Eurodrip (8 and 24 L/h), and Peresi Zalvan (8 and 24 L/h)- were examined under three operating pressures (0.5, 1.5, and 2.5 bar) and two water salinity levels (5 and 12 dS/m). The COMSOL software was used for CFD simulations, focusing on flow velocity distribution, pressure dissipation, and sediment deposition within the labyrinth channels. Moreover, Experimental validation was conducted at the National Salinity Research Center in Yazd, Iran to compare simulated sediment deposition with actual results obtained from emitter degradation tests.

Results and Discussion

The analysis of velocity and pressure variations demonstrated that spiral channels, due to their serrated edges, increase flow velocity up to 2.8 m/s, effectively preventing particle deposition. However, in vortex regions and corners, the flow velocity approaches zero, increasing the risk of sediment accumulation. The pressure dissipation analysis revealed that multiple serrations reduce flow pressure in different emitters by 57% to 87%. Furthermore, the comparison between simulated and experimental sediment variations

exhibited a high degree of correlation ($R^2 = 0.98$). The findings indicate that increasing the inlet water pressure to approximately 2.5 bar and the water salinity to 12 dS/m leads to a 50% and 114% increase in the average sediment volume, respectively. Emitters featuring a pre-settlement zone before the spiral channel demonstrate superior anti-clogging performance. Additionally, increasing the number of flow outlets reduces particle residence time within the channel, thereby lowering the risk of clogging. The findings demonstrated that increasing operating pressure up to 2.5 bar and water salinity resulted in higher sediment levels. In alignment with the simulated results, the laboratory study conducted by Parvizi *et al.* (2025) on the same emitters demonstrated that applying high pressures leads to an increased influx of particles into the labyrinth channels, thereby heightening the risk of clogging. Additionally, Li *et al.* (2024) stated that increasing the operating pressure within a specific range can improve the anti-clogging performance of emitters with a star-shaped channel. However, this operating pressure should not exceed the typical working pressure for this type of emitter, which is approximately 1 bar. Among the tested models, Netafim 25 L/h demonstrated anti-clogging capabilities, attributed to its settling zone preceding the primary labyrinth channel. This structure allowed larger suspended particles to settle before entering finer flow paths, reducing clogging potential. Additionally, multi-exit flow designs, such as Netafim's triple-channel configuration, can effectively minimize particle retention time, lowering obstruction risks. Increasing pressure up to 2.5 bar and salinity led to higher sediment accumulation, confirming that higher pressures exacerbate clogging risks. These findings align with prior research (Yang *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2022), which demonstrated that modifying channel curvature and increasing exit pathways enhances clogging resistance. Studies have further confirmed that increasing flow velocity in labyrinth channels optimizes sediment transport mechanisms (Wei *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2018).

Conclusion

This research demonstrates that CFD simulation is a reliable tool for predicting and optimizing flow behavior and sediment deposition in pressure-compensating emitters. Overall, higher salinity and an increase in inlet flow pressure up to 2.5 bar led to greater sediment accumulation, which can raise the risk of clogging. The findings of this study demonstrated that the geometry of the spiral channel in drip emitters has a direct impact on flow patterns and clogging behavior. While the serrations in the spiral channel enhance flow velocity and reduce sediment accumulation, flow velocity decreases in vortex regions and corners, increasing the likelihood of particle deposition and clogging risks. Furthermore, it is recommended to reduce the risk of clogging by using emitters with modified curved edges instead of sharp ones. Manufacturers should also consider improving and refining sharp corner structures to enhance performance. Additionally, pressure dissipation is better achieved in emitters with multiple serrations, which likely improves their resistance to clogging. Moreover, this study suggests that CFD enables cost-effective and rapid assessment of pressure and salinity management strategies for pressurized irrigation systems. Moreover, findings from this study can be applied to future product development and efficiency enhancements in drip irrigation systems under varying environmental conditions.

Keywords: Labyrinth channel, Operating pressure, Salinity, Sediment, Comsol



© 2023, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.369512.1620>

نوع مقاله: پژوهشی

مطالعه جریان و رسوب در مجرای ماریچ قطرچکان‌های تنظیم‌کننده فشار با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

حسین پرویزی^{۱✉} | زهره رفیعی^۲ | حدیث حاتمی^۳ | علی مومن پور^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸

چکیده

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ابزاری است مناسب به منظور مطالعه رفتار جریان در مجرای قطرچکان‌ها و می‌تواند شرایط مختلف مدیریتی و محیطی منجر به تغییر در عملکرد آن‌ها را با صرف هزینه پایین و در مدت زمان بسیار کوتاه شبیه‌سازی کند. در این پژوهش، رفتار جریان و میزان رسوب‌گذاری در قطرچکان‌های تنظیم‌کننده فشار با مجراهای ماریچ در شرایط مختلف از نظر شوری و فشار آب بررسی گردید. برای این منظور، از نرم‌افزار COMSOL برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شد و نتایج حاصل با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید. بررسی تغییرات سرعت و فشار نشان داد که مجراهای ماریچ به دلیل داشتن دندانه‌ها باعث افزایش سرعت جریان تا ۲/۸ متر بر ثانیه می‌شوند و از رسوب‌گذاری ذرات جلوگیری می‌کنند. با این حال، در نواحی گردابی و گوشه‌ها، سرعت جریان به صفر نزدیک می‌شود و خطر تجمع رسوبات افزایش می‌یابد. تحلیل استهلاک فشار نشان داد که دندانه‌های متعدد، فشار جریان را در قطرچکان‌های مختلف از ۵۷ تا ۸۷ درصد کاهش می‌دهند. مقایسه تغییرات رسوب شبیه‌سازی‌شده و آزمایشگاهی نیز تطابق بالایی ($R^2=0.98$) را نشان داد. نتایج بررسی‌ها حاکی است افزایش فشار آب ورودی تا حدود ۲/۵ بار و شوری آب تا ۱۲ دسی زیمنس بر متر موجب افزایش میانگین حجمی رسوبات به ترتیب به میزان ۵۰ و ۱۱۴ درصد می‌شود و قطرچکان‌هایی که دارای ناحیه تهنشینی اولیه پیش از مجرای ماریچ هستند، عملکرد ضدگرفتگی بهتری دارند. همچنین افزایش تعداد خروجی‌های جریان منجر به کاهش زمان ماند ذرات درون مجرا و کاهش خطر گرفتگی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: رسوب، شوری، فشار جریان، مجرای ماریچ، COMSOL

مقدمه

قطرچکان بر اساس معیارها و استانداردهای مربوط ساخته می‌شوند، اما تغییر شرایط و عوامل متعدد می‌تواند کارایی آن‌ها را تحت تاثیر قرار دهد و در عمل و کاربرد ممکن است نتایج دیگری را نشان دهند. امروزه مدل‌های پیشرفته ریاضی قادر به شبیه‌سازی جریان سیالات و عوامل موثر بر آن در نقش قطرچکان‌ها با توجه به تغییرات گسترده‌ای که از نظر مشخصات و ویژگی‌های فنی و کیفیت ساخت دارند در افزایش کارایی سامانه‌های آبیاری قطرچه ای انکارناپذیر است. امروزه تقریباً تمامی مدل‌های معروف و در دسترس

^۱ بخش آبیاری و فیزیک خاک، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

(✉ نویسنده مسئول: H.parvizi@areeo.ac.ir)

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

^۳ بخش شیمی خاک و تغذیه گیاه، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

^۴ بخش تحقیقات زراعت و باغبانی، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

شبیه‌سازی رفتار جریان در این قطره‌چکان‌هاست. علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که می‌توان با اصلاح ساختار مسیرهای مارپیچ از زاویه‌های تند به انحنای دوار نسبت گرفتگی را در قطره‌چکان‌ها کاهش داد. در روشی مشابه با پژوهش گفته‌شده، یانگ و همکاران (Yang et al., 2020) نشان دادند که با تغییر ساختار مجرای مارپیچ به گونه‌ای که مساحت ناحیه جریان اصلی و انرژی جنبشی جریان متلاطم در ناحیه کم سرعت افزایش یابد، شدت انتقال ذرات را افزایش و فاصله انتقال و مدت زمان ماند آن‌ها را کاهش می‌دهد و در نتیجه احتمال گرفتگی کاهش می‌یابد. افزون بر این، عملکرد CFD در مقایسه میزان جریان خروجی در چهار مجرای مارپیچ مختلف در قطره‌چکان‌های درون خط توسط بقیل و همکاران (Baghel et al., 2021) بررسی شده است. بر این اساس، کمترین میزان اتلاف فشار برای مارپیچ‌های مستطیل شکل حاصل گردیده‌است. پژوهش‌های مشابه دیگری نیز در این زمینه که نشان دهنده استفاده گسترده از CFD است توسط یو و همکاران (Yu et al., 2018)، دمیر و همکاران (Demir et al., 2020) و ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2022) اجرا شده است. بررسی نحوه رسوب گذاری یا تاثیرات فشار بر میزان گرفتگی در قطره‌چکان‌های دارای مجرای مارپیچ نیز در پژوهش‌های مختلفی (Li et al., 2006; Wei et al., 2006; Ramachandrala and Kasa, 2020; Li et al., 2024; De Marchis et al., 2025) بررسی شده است.

بر اساس آنچه گفته شد، پژوهش حاضر به صورت آزمایشگاهی اجرا و پس از آن از مدل‌های ریاضی با هدف بررسی و مدل‌سازی رفتار جریان در اثر تغییر شوری و فشار در قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار بهره‌گیری شده است. در واقع در این پژوهش مسئله شوری بالای آب آبیاری در ترکیب با فشار بالا به عنوان عاملی بررسی شده است که در پژوهش‌های پیشین مد نظر قرار نگرفته‌اند. افزون بر این، سعی شده است تا با مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج واقعی

مجاری مختلف مانند لوله‌ها و قطره‌چکان‌ها هستند و با استفاده از آن‌ها می‌توان شرایط مختلف مدیریتی و محیطی منجر به تغییر در عملکرد قطره‌چکان‌ها را با صرف هزینه پایین و در مدت زمان بسیار کم بررسی کرد. از ابزارهای مناسبی که می‌تواند برای مطالعه رفتار جریان حین عبور از مجرای قطره‌چکان‌ها استفاده شود، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است. CFD به دلیل پایین بودن هزینه، بالابودن سرعت و در اختیار قرار دادن اطلاعات کامل می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای کمک به مطالعه هیدرولیک جریان باشد (Delghandi et al., 2010; Delghandi et al., 2013).

کمرگو و همکاران (Camargo et al., 2020) می‌گویند CFD می‌تواند روشی دقیق، سریع و قابل اجرا برای بررسی پارامترهای جریان در لوله‌های آبیاری، اتصالات، قطره‌چکان‌ها و لوازم جانبی باشد و در طراحی محصولات جدید و بهبود محصولات موجود و بهینه‌سازی آن‌ها مفید واقع شود. در خصوص استفاده از CFD تاکنون پژوهش‌های مختلفی در جهان شده است که از آن جمله می‌توان به ارزیابی گرفتگی قطره‌چکان‌ها توسط وی و همکاران (Wei et al., 2008) اشاره کرد؛ تحقیقات این محققان روی سه نوع قطره‌چکان با مجاری متفاوت اجرا شده است و نتایج آن نشان دهنده دقت مناسب روش CFD در شبیه سازی محل تجمع رسوبات و گرفتگی در قطره‌چکان‌های مختلف است. پژوهشگران دیگری نیز از CFD به منظور طراحی قطره‌چکان‌های جدید بهره برده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که قطره‌چکان‌های با زاویه‌های انحنای مجاری بیشتر، خطر گرفتگی کمتری دارند، آن‌ها می‌افزایند این روش باعث کاهش هزینه‌ها و تسریع در ساخت قطره‌چکان‌های جدید می‌شود (Celik et al., 2011; Fan et al., 2014). وی و همکاران (Wei et al., 2012) به بررسی و تحلیل جریان در قطره‌چکان‌های طولانی‌مسیر با مسیرهای مارپیچ مستطیلی و زیگزاگ در نمونه آزمایشگاهی پرداختند و نتایج حاصل را با CFD مقایسه و بیان کردند که CFD به خوبی قادر به

که از تخریب نمونه‌های قطره‌چکان پس از آزمایش‌ها به‌دست آمده است، زمینه برای اجرای پژوهش‌های تکمیلی کم هزینه و سریع در زمینه قطره‌چکان‌ها و شرایط مدیریتی متنوع مانند کاربرد آب شور آماده شود.

روش پژوهش

مکان و نحوه اجرای آزمایش

پژوهش حاضر در مرکز ملی تحقیقات شوری واقع در

است.

جدول ۱- مشخصات قطره‌چکان و تیمارهای کاربردی فشار و شوری در پژوهش

Table 1- Specifications of the drip emitter and applied pressure and salinity treatments in the study

نوع قطره‌چکان	آبدهی اسمی (لیتر در ساعت)	فشار آب ارزیابی (بار)	سطوح شوری (دسی زیمنس بر متر)
نتافیم (خارجی)	۸	۰/۵ و ۱/۵ و ۲/۵	۵ و ۱۲
	۲۵		
یورودریپ (خارجی)	۸		
	۲۴		
پرسی زالوان (ایرانی)	۸		
	۲۴		

جدول ۲- ویژگی‌های کیفی آب مورد استفاده در آزمایش‌ها

Table 2- Qualitative properties of the water used in the experiments

EC (dS/m)	pH	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Mg ⁺²	Ca ⁺²	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ⁻²	RSC	LSI
۵/۲۴	۷/۹۱	۰	۳/۰۳	۴۰/۳	۷/۶	۵/۳۷	۳۶/۶	۰/۳۷	۷/۴	-۹/۹	۰/۲۵
۱۲/۱۱	۷/۹۴	۰	۲/۸۹	۱۰۵/۵	۱۵/۹	۶/۵۵	۱۰۱/۵	۰/۴۲	۱۳/۱	-۱۹/۱	۰/۱۳

* پارامترهای LSI، RSC، pH و EC به ترتیب نشان دهنده نمایه اشباع لائزیر، باقی‌مانده کربنات سدیم، اسیدیته و شوری آب هستند.

*The LSI, RSC, pH, and EC parameters indicate the Langelier Saturation Index, Residual Sodium Carbonate, acidity, and salinity of the water, respectively.

در مسائل مهندسی است. علاوه بر این، توانایی محاسبات موازی و شبکه‌سازی آن و نیز اجرای تحلیل‌های عددی سنگین روی پردازنده‌های چند هسته‌ای را تسهیل می‌کند. برای شروع کار با COMSOL، ابتدا باید هندسه مدل موردنظر را با ابزارهای داخلی نرم‌افزار طراحی کرد. پس از آن فیزیک‌های مرتبط انتخاب و معادلات حاکم و شرایط مرزی تعیین می‌شود تا رفتار سیستم مشخص شود. مرحله بعد شامل تولید شبکه عددی (Mesh Generation) است که برای حل دقیق معادلات ضروری است. پس از آن، روش‌های حل و تنظیم پارامترهای موردنیاز برای تحلیل عددی انتخاب می‌شوند. COMSOL بر پایه حل

شبیه‌سازی جریان در قطره‌چکان‌ها

نرم‌افزار COMSOL Multiphysics

نرم‌افزار COMSOL Multiphysics پلتفرمی قدرتمند برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی پدیده‌های فیزیکی و چندفیزیکی است. این نرم‌افزار با قابلیت مدل‌سازی چندفیزیکی امکان تحلیل هم‌زمان مکانیک جامدات، انتقال حرارت، دینامیک سیالات، الکترومغناطیس و واکنش‌های شیمیایی را فراهم می‌کند. COMSOL به MATLAB و دیگر پلتفرم‌ها متصل می‌شود و امکان تحلیل پارامتری و بهینه‌سازی را فراهم می‌آورد که شامل بررسی حساسیت پارامترها و یافتن تنظیمات بهینه

است. در واقع در استفاده از CFD در تجزیه و تحلیل جریان در تمامی قسمت‌های قطره‌چکان‌های تنظیم کننده فشار به دلیل ساختار پیچیده‌ای که دارند با محدودیت روبه‌رو است. این امر به دلیل تعامل بین دیافراگم و آب در رفتار واقعی است که نتیجه آن تغییرات بسیار در شکل حوزه‌های جریانی است (Seo et al., 2024). بنابراین، در این پژوهش نیز به‌رغم استفاده از نمونه‌های تنظیم کننده فشار، تنها مجرای ماریچ بررسی شده است. مدل شبکه‌بندی برای این پژوهش مش‌های Hexahedral با اندازه درشت است.

شرایط مرزی و مولفه‌های ورودی

در نظر گرفتن شرایط مرزی از دیگر مولفه‌های مهم در حل معادلات است که باید وارد مدل شود. در این پژوهش فشار خروجی معادل فشار اتمسفر برای قطره‌چکان‌ها و سرعت صفر در جداره‌ها از جمله این شرایط بود. علاوه بر این، فشار ورودی ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ بار بود. از آنجا که شبیه سازی همزمان اثرهای جابه‌جایی دیافراگم ناشی از تغییر فشار و اثر آن بر آبدی و شبیه سازی رسوب ذرات عملاً امکان پذیر نیست، بنابراین، با وارد کردن مقدار سرعت در خروجی هر قطره‌چکان به عنوان یک شرط مرزی با توجه به مساحت سطح مقطع و آبدی اسمی قطره‌چکان‌های مختلف میزان آبدی خروجی مطابق با آبدی اسمی قطره‌چکان‌ها تنظیم گردید. به‌علاوه، ویژگی‌های سیال که همان آب است از طریق موارد پیش فرض موجود در نرم افزار انتخاب گردید. در این پژوهش، همچنین ویژگی‌های ذرات جامد با در نظر گرفتن کربنات کلسیم (CaCO₃) به عنوان ذره اصلی هسته رسوب تعیین شد. بدین منظور چگالی ذرات جامد ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. قطر ذرات نیز با توجه به مش فیلتر مورد استفاده در آزمایش‌ها، که برابر با ۱۳۰ میکرون بود، به طور میانگین ۶۵ میکرون در نظر گرفته شد (Wei et al., 2008).

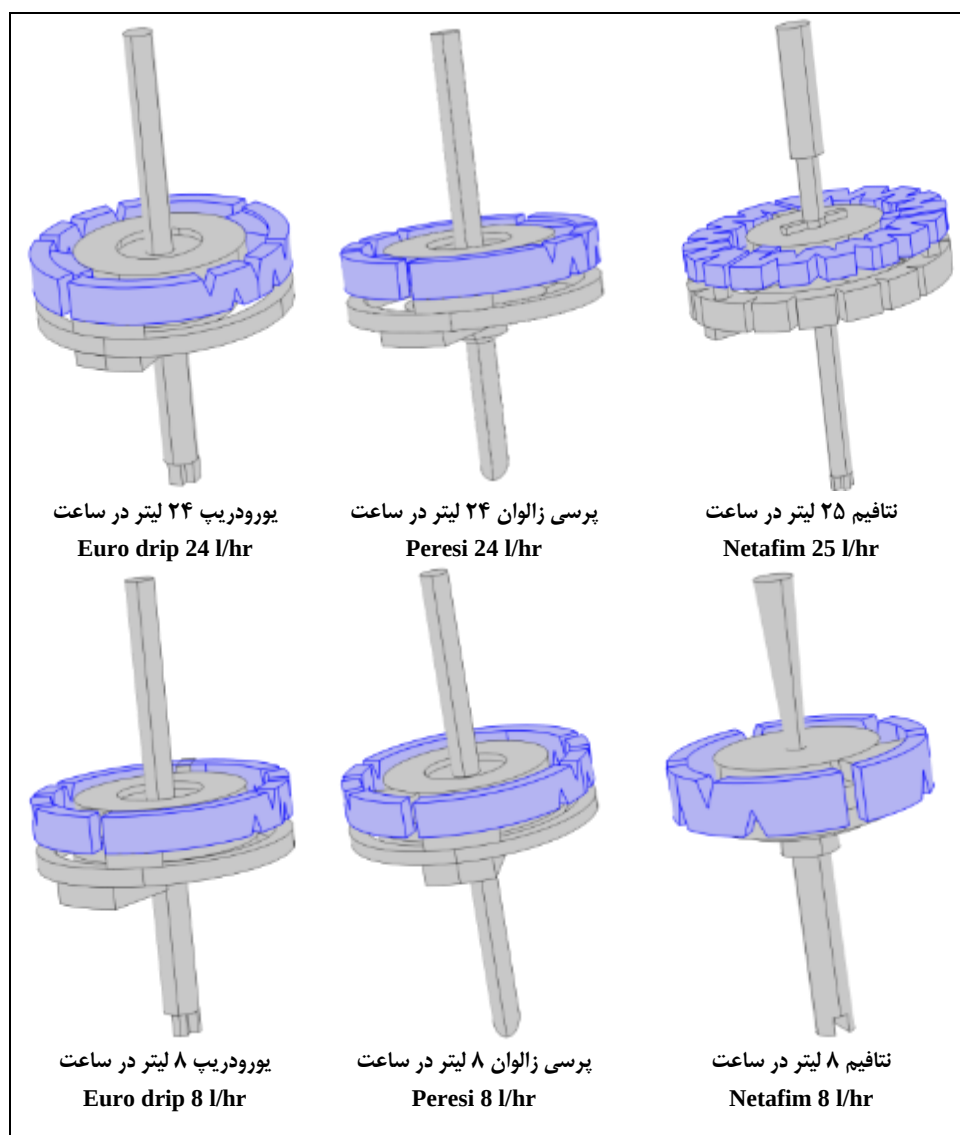
معادلات دیفرانسیل جزئی (PDEs) عمل می‌کند و شامل معادلاتی مانند لاپلاس، ناویر-استوکس، انتقال حرارت و الکترومغناطیس است که برای مدل سازی پدیده‌های مختلف استفاده می‌شوند. معادله پایه مورد استفاده برای این پژوهش همان فرم کلی معادله ناویر-استوکس برای سیال تراکم‌ناپذیر است که در زیر ارائه شده است.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + F \quad (1)$$

که در آن: ρ چگالی سیال، u بردار سرعت، t زمان، p فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی، ∇ لاپلاسی (نشان دهنده پخشیدگی ویسکوزیته)، f نیروهای حجمی خارجی (مانند گرانش) است. این نرم‌افزار از روش عددی المان محدود (FEM) برای تقریب‌های عددی و تحلیل سیستم‌های پیچیده بهره می‌برد. مدل‌های فیزیکی پیشرفته‌ای مانند دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، واکنش‌های شیمیایی، انتقال جرم و حرارت، و سیستم‌های ترمودینامیکی را پشتیبانی می‌کند. با اجرای شبیه‌سازی در این نرم افزار، سیستم معادلات حل خواهد شد و نتایج عددی ارائه می‌شوند. پس از دستیابی به نتایج اولیه، داده‌ها تحلیل می‌شوند تا تأثیر تغییرات پارامترها بررسی گردد. سرانجام، تنظیمات سیستم بهینه‌سازی می‌شود تا عملکرد مدل دقیق‌تر و کارآمدتر باشد، که منجر به بهبود کیفیت شبیه‌سازی و افزایش دقت محاسبات خواهد شد.

ترسیم هندسه

در گام اول باید هندسه ناحیه محاسباتی که همان مسیر عبور سیال از قطره‌چکان است رسم و شبکه بندی شود. بدین منظور، ابتدا هر یک از قطره‌چکان‌های مورد استفاده با نشان تجاری و آبدی مختلف با استفاده از نرم افزار COMSOL 6.1 به صورت سه بعدی طراحی گردید (شکل ۱). لازم است گفته شود این تصاویر سه بعدی همان مجراهای عبور آب هستند و در واقع فضاهای خالی و محل عبور آب را در قطره‌چکان‌ها نشان می‌دهند و قسمت‌های جامد و بدنه آن‌ها به دلیل آنکه نیاز نبوده است رسم نشده



شکل ۱- ترسیم مجرای عبور آب در قطره‌چکان‌های مختلف به منظور شبیه سازی جریان در آن‌ها. مجراهای ماریچ با رنگ آبی نشان داده شده‌اند. مقیاس رسم شکل‌ها یکسان نیست.

Fig. 1- The depiction of water flow channels in different emitters for flow simulation. The labyrinth channels are shown in blue and the scaling of the illustrations is not uniform.

در این مدل، فاز پیوسته (آب) و فاز پراکنده (ذرات جامد)

هستند. سه فرض زیر برای حل این مدل در COMSOL در نظر گرفته شده است:

- چگالی هر فاز تقریباً ثابت است.
- هر دو فاز میدان فشار یکسانی دارند.
- زمان استراحت ذرات در مقایسه با زمان جریان کوتاه است.

حل عددی

در گام دوم با در نظر گرفتن پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی حاکم بر سیال، معادلات مربوط استخراج و مدل مناسب با حل آن‌ها در نرم افزار انتخاب شد و شبیه سازی به اجرا درآمد. در این پژوهش، هدف شبیه سازی رسوب و گرفتگی احتمالی قطره‌چکان‌هاست بنابراین ذرات جامد در فاز مایع پراکنده شده است و نیاز به شبیه سازی جریان به صورت دو فاز خواهد بود که توسط مدل مختلط اجرا گردید.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_d) + j \cdot \nabla \phi_d + \nabla \cdot (j_{slip}) \quad (9)$$

$$= \nabla \cdot (D_{md} \nabla \phi_d) - \frac{m_{dc} \rho}{\rho_d \rho_c}$$

که در آن D_{md} ضریب پخشیدگی آشفته‌گی است. کسر حجمی فاز پیوسته یا مایع از تفاوت کسر حجمی فاز جامد و عدد ۱ حاصل می‌گردد. با توجه به اینکه جریان درون قطره‌چکان‌ها آشفته است (Wei et al., 2006)، تاثیر اغتشاش در جریان از مدل استاندارد اغتشاشی $K-\epsilon$ به شرح زیر به دست آمد:

$$\rho(j \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_T} \right) \nabla k \right] + pk - \rho \epsilon \quad (10)$$

$$\rho(j \cdot \nabla)\epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_T} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{K} pk - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{K} \rho \quad (11)$$

$$pk = \mu_T \left[\nabla j : (\nabla j + (\nabla j)^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot j)^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot j \quad (12)$$

در این معادلات، $C_{\epsilon 1} = 1/44$ ، $C_{\epsilon 2} = 1/92$ و $\sigma_T = 0.35$

ضریب‌های تصحیح و ثابت هستند که مقادیر آن‌ها به پیشنهاد لندر و اسپالدینگ (Lauder & Spalding, 1983) انتخاب شدند. در این مسئله، با توجه به کم‌بودن تأثیر وزن آب در مقایسه با تأثیر فشار آب، از تأثیر وزن آب و کشش سطحی آب صرف نظر شد. علاوه بر این، با توجه به اینکه کسر حجمی ذرات جامد درون سیال (نسبت حجم ذرات به حجم واحد آب) به عنوان مقدار اولیه ورودی برای اجرای محاسبات بر اساس میزان شوری آب متغیر بود، این کسر با استفاده از مجموع مقادیر کربنات کلسیم و مواد جامد انحلال‌ناپذیر اندازه‌گیری شده آب در هر شوری و با استفاده از معادله چگالی تعیین گردید. در واقع کربنات کلسیم و مواد جامد انحلال‌ناپذیر تشکیل دهنده ذرات جامد هستند و مقادیر جرم کربنات کلسیم از طریق آزمایش تجزیه آب در هر شوری بر حسب میلی گرم در لیتر و مقادیر جرم مواد جامد انحلال‌ناپذیر نیز به روش عبور حجم مشخص آب از کاغذ صافی استاندارد و توزین مواد باقی‌مانده تعیین شد. پس از محاسبه جرم مواد جامد کل در هر شوری با داشتن چگالی ذرات، این جرم به حجم تبدیل شد و در نهایت با توجه به اینکه حجم محاسبه شده مربوط به ذرات درون حجم مشخص سیال بود (یک لیتر)، نشان دهنده کسر حجمی

بنابراین، چگالی (ρ)، فلاکس حجمی (j)، کسر حجمی (ϕ)، ویسکوزیته (μ) و بردار سرعت (u) جریان مخلوط طبق معادلات زیر از مجموع هر پارامتر در فاز پیوسته یا مایع با اندیس c و فاز پراکنده یا جامد با اندیس d به دست می‌آید. تمامی واحدها بر حسب سیستم استاندارد SI هستند.

$$\rho = \rho_c \phi_c + \rho_d \phi_d \quad (2)$$

$$j = j_c + j_d = u_c \phi_c + u_d \phi_d \quad (3)$$

$$u = \frac{\rho_c u_c \phi_c + \rho_d u_d \phi_d}{\rho} \quad (4)$$

بنابراین معادله پیوستگی عبارت است از:

$$\nabla \cdot j = m_{dc} \left(\frac{1}{\rho_c} - \frac{1}{\rho_d} \right) \quad (5)$$

که در آن m_{dc} شدت انتقال جرم از فاز پراکنده به پیوسته است. معادله مومنتم نیز عبارت است از:

$$\rho j_t + \rho (\nabla \cdot j) j + \rho_c \epsilon (j_{slip} \cdot \nabla) j = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot \tau_{Gm} + \rho g \quad (6)$$

که در آن، اندیس slip مقدار نسبی هر پارامتر بین دو فاز مختلف، ϵ تفاوت چگالی کاهش یافته، τ_{Gm} مجموع تنش‌های اغتشاشی و چسبندگی و g شتاب گرانش است. مقدار برخی از این پارامترها طبق معادلات زیر حاصل می‌شود.

$$\tau_{Gm} = (\mu + \mu_T) [\nabla j + \nabla j^T] - \frac{2}{3} (\mu + \mu_T) (\nabla \cdot j) I - \frac{2}{3} \rho k I \quad (7)$$

که در آن، k و μ_T به ترتیب انرژی جنبشی و ویسکوزیته آشفته‌گی و μ ویسکوزیته مخلوط است.

$$\epsilon = \frac{\rho_d - \rho_c}{\rho_c}, \quad j_{slip} = \phi_c \phi_d u_{slip} \quad (8)$$

در این معادله، u_{slip} نشان دهنده سرعت نسبی بین دو فاز است که به دلیل وجود نیروی شناوری ایجاد شده است که از سمت سیال به ذرات وارد می‌شود و باید توسط معادلاتی لحاظ گردد که در این پژوهش از مدل شیلر-نیومن استفاده گردید. کسر حجمی ذرات جامد معلق و ذرات منجر به رسوب (فاز پراکنده) در آب در هر نقطه از هندسه با استفاده از معادله انتقال و توسط معادله زیر به دست می‌آید.

این مکان‌ها مستعد ته نشینی ذرات‌اند. در نتیجه، رسوب‌گذاری و انسداد مجرا می‌تواند در این قسمت‌ها رخ دهد. بنابراین، یکی از راه‌های جلوگیری از تجمع و رسوب ذرات، افزایش سرعت در نواحی گوشه‌ای از طریق تغییر در شکل یا ساختار گوشه‌هاست. یانگ و همکاران (Yang et al., 2020) نشان دادند که با بهبود و تغییر ساختار گوشه‌های کانال جریان، مساحت منطقه جریان اصلی و ناحیه کم‌سرعت در قطره‌چکان افزایش می‌یابد. انرژی آشفتگی در ناحیه کم‌سرعت نیز بین ۵۲ تا ۲۰۰ درصد افزایش می‌یابد و آهنگ انتقال ذرات بیشتر می‌شود و فاصله جابه‌جایی و زمان ماندگاری ذرات کاهش می‌یابد. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تغییر ساختار گوشه‌ها به گونه‌ای که قسمت‌های تیز آن به شکل منحنی اصلاح شود منجر به کاهش تجمع ذرات رسوبی تا ۶۰ درصد بدون اثر منفی بر ویژگی‌های جریان می‌شود (Qin et al., 2022). در باره تفاوت بین پروفایل‌های سرعت در نمونه‌های مختلف، با توجه به اینکه نمونه ایرانی پرسی زالوان کاملاً شبیه نمونه خارجی یورودریپ در هر دو آبدی است بنابراین شباهت آن‌ها قابل انتظار بود. حداکثر میزان سرعت جریان در نمونه‌های با آبدی ۲۴ لیتر در ساعت از این دو نشان تجاری به ترتیب ۲/۸۳ و ۲/۶۷ متر در ساعت برای یورودریپ و پرسی زالوان بود. برای همین نشان‌های تجاری و در مقایسه با آبدی ۲۴ لیتر در ساعت، مقادیر سرعت در آبدی ۸ لیتر در ساعت کمتر و به ترتیب برابر با ۲/۰۶ و ۲/۲۶ متر بر ساعت بود. برای نشان تجاری نتافیم، شکل و مجرای ماریچ در آبدی پایین و بالا کاملاً با یکدیگر متفاوت بود. بنابراین، توزیع سرعت نیز کاملاً متفاوت بود. در نمونه ۸ لیتر در ساعت، حداکثر سرعت در برخی مقاطع تا ۲/۳۵ متر بر ساعت نیز رسید. در حالی که برای آبدی ۲۵ لیتر در ساعت حداکثر سرعت برابر با ۱/۶۹ متر در هر ساعت بود. در واقع، برای نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت، سرعت پایین‌تر جریان در مقایسه با دیگر نمونه‌ها در هر دو آبدی به دلیل افقی بودن مجرای

ذرات درون سیال (آب) است به گونه‌ای که برای شوری‌های ۵ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر این کسر به ترتیب برابر با ۰/۰۰۱۴۸ و ۰/۰۰۳۳۳ بود.

حل همزمان معادلات به صورت دستی کاری بسیار سخت و زمان‌بر است و برای ساده‌سازی باید از فرض‌های ساده‌شونده استفاده کنیم که دقت کار را پایین می‌آورد. نرم افزار COMSOL با گسسته‌سازی، این معادلات را به معادلات جبری تبدیل می‌کند و پس از آن با روش المان‌های محدود به حل معادلات می‌پردازد. نکته قابل توجه در این خصوص مسئله وابستگی به زمان است. در واقع با توجه به اینکه فرآیند رسوب‌گذاری در قطره‌چکان‌ها با گذشت زمان تکرار می‌شود نیاز بود تا مسائل به صورت وابسته به زمان حل شوند. به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با واقعیت، علاوه بر تصویربرداری از مجرای عبور آب در قطره‌چکان‌های مختلف و مقایسه تصاویر واقعی تجمع رسوب با شبیه‌سازی شده نسبت به اندازه‌گیری جرم واقعی رسوب نیز اقدام گردید. بنابراین، ابتدا مجرای ماریچ سه عدد قطره‌چکان از هر نوع با ترازوی دقیق وزن گردید. پس از آن، قطره‌چکان‌ها با کمک اسید سولفوریک و سرکه کاملاً شسته و خشک گردید و مجدداً وزن گردید و مقادیر واقعی رسوب از اختلاف این دو وزن به دست آمد. مقادیر جرم رسوب شبیه‌سازی شده نیز از معادله چگالی محاسبه گردید.

نتایج و بحث

توزیع سرعت و فشار در مجرای ماریچ قطره‌چکان‌ها

شکل (۲) تغییرات سرعت جریان و خطوط جریان را در مجرای ماریچ قطره‌چکان‌های مختلف در شرایط کاربرد شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر و فشار ۰/۵ بار به عنوان نمونه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود دندان‌ها در ساختار دوزنقه‌ای شکل در تمام نمونه‌ها باعث افزایش سرعت جریان و مانع از رسوب ذرات جامد می‌شود. با این حال، در گوشه‌ها سرعت جریان تقریباً صفر هستند و

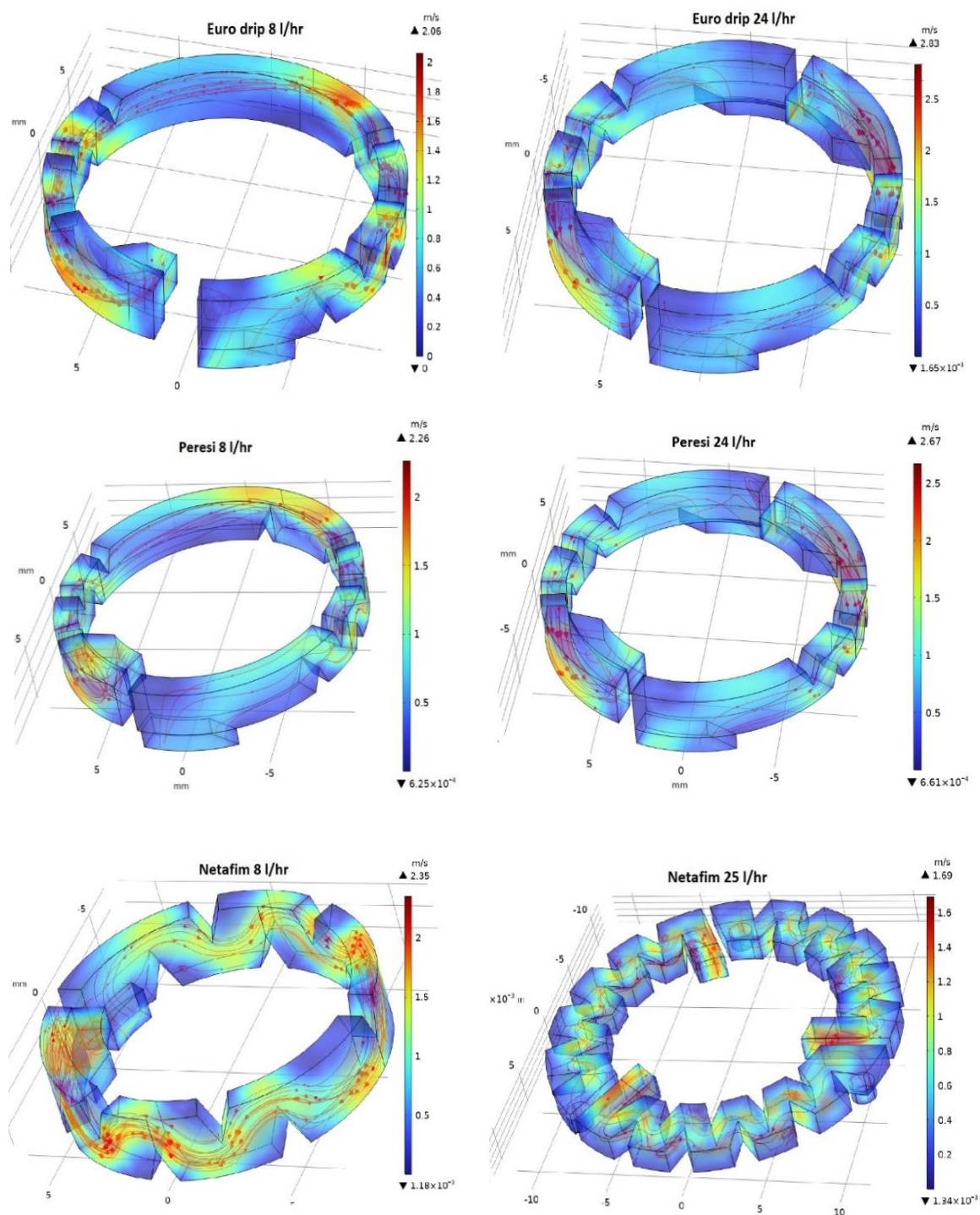
در مسیر کوتاهی رخ داده است. با این حال، میزان فشار مستهلک شده پس از آخرین دندان و تا پیش از مجرای خروج در نمونه‌های مختلف متفاوت است. برای قطره‌چکان‌های یورودریپ و پرسی زالوان در آبدهی ۸ لیتر در ساعت، ۸۷ درصد فشار توسط دندان‌ها مستهلک شده است. میزان استهلاک توسط دندان‌ها در نمونه‌های ۲۴ لیتر در ساعت کمتر و برابر با ۵۸ درصد است. علاوه بر این، میزان استهلاک فشار توسط دندان‌ها در قطره‌چکان‌های نتافیم ۸ و ۲۵ لیتر در ساعت به ترتیب ۷۱ و ۵۷ درصد است. تعداد دندان‌ها، فاصله آن‌ها از یکدیگر و طول مسیر جریان از جمله دلایل تفاوت بین توانایی قطره‌چکان‌ها در مستهلک کردن فشار است. دژوانگ و همکاران (Dazhuang et al., 2007) می‌گویند کاهش مقادیر فشار در طول مسیر مجرای ماریچج نتیجه مستقیم مستهلک شدن انرژی جریان در اثر نوع ساختار ماریچج در قطره‌چکان‌های مختلف است.

این پژوهشگران همچنین نشان دادند که شکل و ساختار دندان‌ها از نظر ارتفاع دندان، فاصله آن‌ها از یکدیگر (عرض مسیر جریان) و زاویه آن‌ها بر مکانیزم استهلاک انرژی و فشار در طول مسیر اثر گذار است و نحوه توزیع سرعت را نیز متفاوت می‌کند و اگر نسبت ارتفاع دندان‌ها به عرض جریان یک باشد، بهترین ویژگی‌های هیدرولیکی اتفاق می‌افتد. لازم است گفته شود برای این پژوهش اگر چه چنین وضعیتی در تمامی نمونه‌ها برقرار بود و نسبت ارتفاع دندان‌ها به عرض جریان برابر یک بود، اما بزرگ‌ترین عرض جریان و به میزان ۲ میلی متر مربوط به نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت بود. بنابراین، مقادیر حداکثر سرعت برای این نمونه بسیار کمتر از دیگر قطره‌چکان‌ها است. در خصوص اثر تغییرات فشار و توانایی مجراهای مختلف در مستهلک کردن فشار، اگر چه شکل‌های مرتبط با آن در اینجا ارائه نشده است اما برای یک نوع مجرای خاص، میزان فشار مستهلک شده در هر سه فشار آب ۰/۵ بار به ۱/۵ و سپس ۲/۵ بار با یکدیگر برابر است.

ماریچج بود. دلیل این امر نیز پهن بودن عرض مجرای جریان است که منجر به بزرگ‌تر شدن مقطع عبور آب و در نتیجه کاهش سرعت جریان می‌شود. مشابه با نتایج این پژوهش، اوآریچی و همکاران (Ouarriche et al., 2023) نشان دادند که در مجرای دوزنقه‌ای قطره‌چکان تنظیم کننده فشار، میزان سرعت پس از عبور از روی دندان‌ها و در پایین دست به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و در مقابل میزان سرعت به طور قابل توجهی در ناحیه گردابی کاهش می‌یابد و نهایتاً در محل گوشه‌ها یا همان ناحیه مرگ به صفر می‌رسد. به عبارتی، ذرات از جریان غالبی که با خروج سیال شکل گرفته است پیروی نمی‌کنند و در مناطق چرخشی یا مرده به دام می‌افتند. این پدیده که باعث گرفتگی قطره‌چکان‌ها می‌شود به دلیل قرارگیری ذرات درون سیال تحت نیروهای اینرسی عرضی حاصل از شتاب آن‌هاست (Yu et al., 2018). این نیروهای اینرسی مسئول انحراف تدریجی ذرات هستند که آن‌ها را به مناطق چرخشی و مرده هدایت می‌کند. علاوه بر تأثیر اینرسی، تعاملات هیدرودینامیکی بین ذرات به تشکیل کلونیدها در مناطق مرده کمک می‌کند که منجر به باریک شدن کانال جریان می‌شود. همه این عوامل تأیید می‌کنند که مناطق گردابی و سرعت پایین، اصلی‌ترین دلایل گرفتگی قطره‌چکان هستند (Ouarriche et al., 2023).

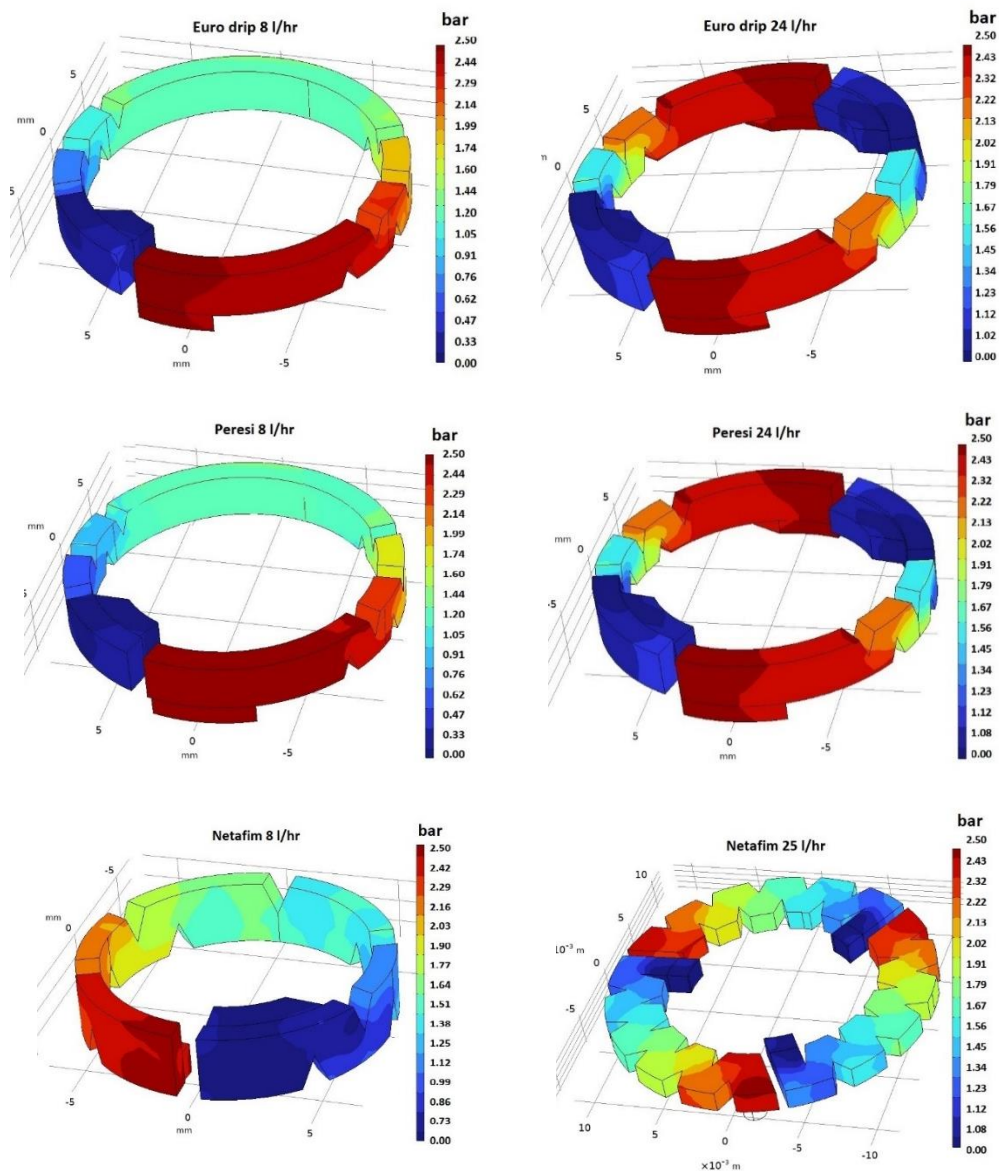
شکل (۳) چگونگی استهلاک فشار ۲/۵ بار را در مجرای ماریچج قطره‌چکان‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل، فشار جریان پس از ورود به مجرا و با رسیدن به هر یک از دندان‌ها مستهلک می‌شود و کاهش می‌یابد و در نهایت در محل خروج به صفر یا همان فشار اتمسفر می‌رسد. مقایسه مجراهای مختلف نیز نشان دهنده استهلاک فشار در محل دندان‌ها یا به اصطلاح همان ساختار ماریچج است. برای مثال، در نمونه ۸ لیتر در ساعت یورودریپ که در بخش قابل توجهی از آن دندان‌های وجود ندارد، فشاری نیز مستهلک نشده است. در مقابل، اما در نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت، به دلیل تعداد زیاد دندان‌ها استهلاک فشار قابل توجه ۲/۵ بار

مطالعه جریان و رسوب در مجرای ماریچ قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار ...



شکل ۲- نتایج شبیه سازی شده توزیع سرعت جریان و خطوط جریان در مجرای ماریچ قطره‌چکان‌های مختلف با نرم افزار COMSOL.

Fig. 2- Simulated flow velocity distribution and streamlines in the labyrinth channel of different emitters using COMSOL software.



شکل ۳- نتایج شبیه سازی شده استهلاک فشار ۲/۵ بار در مجرای مارپیچ قطره‌چکان‌های مختلف توسط نرم افزار COMSOL.

Fig. 3- Simulated results of 2.5 bar pressure dissipation in the labyrinth channel of different emitters using COMSOL software.

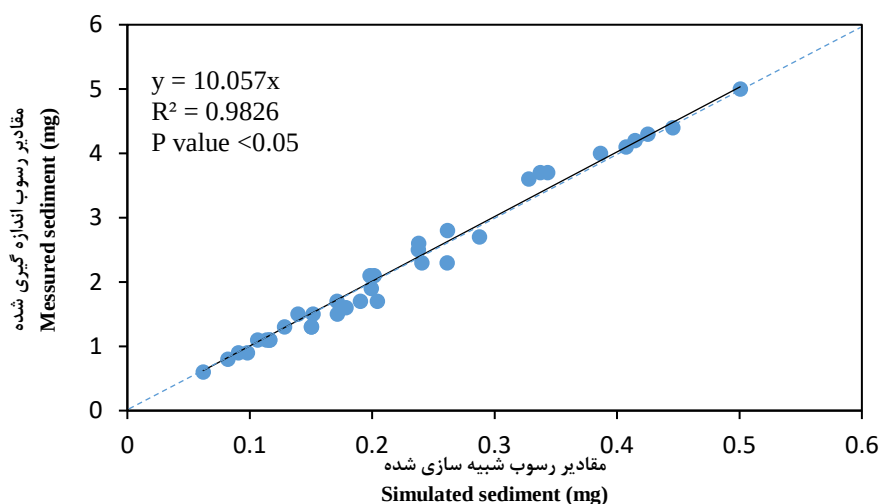
شبیه سازی میزان رسوب در قطره‌چکان‌ها

است. شیب معادله از نظر آماری معنی دار است و تطابق آن با خط یک به یک نشان می‌دهد مقادیر رسوب با دقت بالا پیش بینی شده‌اند. به‌رغم دقت بالای مدل در پیش بینی میزان تغییرات رسوب در قطره‌چکان‌های مختلف منطبق با این تغییرات در واقعیت، کم برآورد قابل توجهی (۱۰ برابر) توسط مدل در شبیه سازی جرم رسوبات مشاهده شد. دلیل این تفاوت فاحش را می‌توان مربوط به مسئله تجمع رسوبات در طول زمان در واقعیت دانست. به عبارتی این قطره‌چکان‌ها

شکل (۴) نتایج مقایسه میزان رسوب واقعی و شبیه سازی شده در مجرای مارپیچ قطره‌چکان‌ها را نشان می‌دهد. بر این اساس، تطابق بالایی بین مقادیر رسوب شبیه سازی شده و اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود و میزان پراکندگی نیز بسیار پایین است ($R^2=0.983$). علاوه بر این، بررسی شیب و عرض از مبدا معادله برازشی نشان می‌دهد که عرض از مبدا از نظر آماری معنی داری نیست و قابل حذف شدن

برای کمک به طراحی قطره چکان های با مجاری ماریچ باشد و با کاهش تعداد قالب های آزمایشی، هزینه تولید قطره چکان ها کاهش می یابد. در تحلیلی بر اندازه کوچک و ساختار پیچیده کانال های ماریچی سه نوع قطره چکان با ساختارهای متفاوت، شامل مثلثی، مستطیلی و دوزنقه ای توسط وی و همکاران (Wei et al., 2006) این گونه بیان گردید که داده های شبیه سازی شده کانال های ماریچی به طور دقیق با داده های تجربی مطابقت دارند.

بیش از یک سال و طی ۶۵ رویداد آبیاری با فاصله یک هفته ای در شرایط آزمایشی قرار داشتند (Parvizi et al., 2025). بنابراین، میزان رسوبات طی رویدادهای مختلف آبیاری روی یکدیگر انباشته شده است، در حالی که نتایج شبیه سازی ها مربوط به یک بار شبیه سازی و مستقل از زمان است. دلغندی و همکاران (Delghandi et al., 2010) نشان دادند که داده های به دست آمده از شبیه سازی به وسیله CFD مطابقت بسیار خوبی با داده های آزمایشگاهی دارد و دینامیک سیالات محاسباتی می تواند ابزار بسیار مناسبی



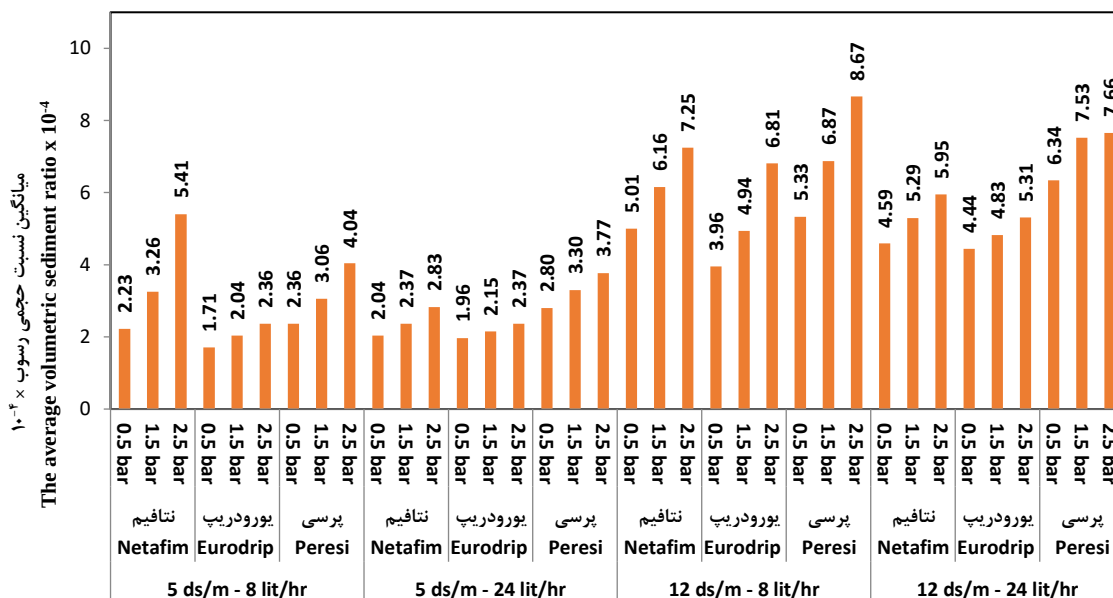
شکل ۴- مقایسه میزان رسوب اندازه گیری و شبیه سازی شده توسط نرم افزار COMSOL در مجرای ماریچ قطرچکان ها.

Fig. 4- Comparison of the measured and simulated sediment values using COMSOL software in the labyrinth channel of emitters.

در ساعت، مدل های یورودریپ، پرسی زالوان و نتافیم به ترتیب مقادیر کمتری از نسبت حجمی رسوب را داشته اند و بنابراین ریسک گرفتگی در مدل یورودریپ کمتر است. بطور کلی و بر اساس شکل، در آبدی بالا قطرچکان های پرسی بیشترین میزان نسبت رسوب را در حجم سیال نشان داده اند. در حالی که نتافیم دارای حداقل مقادیر نسبت حجمی رسوب بود. نتایج تحقیقات ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2022) نشان می دهد توانایی ضد گرفتگی قطرچکان به ساختار، جنس و فناوری پردازش آن بستگی دارد و عوامل خارجی مانند تفاوت در کیفیت آب اثر یکسانی بر انواع قطرچکان دارند. بنابراین، در تطابق با این یافته می توان دلیل نتایج این پژوهش را با توجه به تفاوت

با توجه به دقت بالای شبیه سازی ها، می توان نتایج حاصل از آن را به منظور مقایسه اثر تیمارهای مختلف بر میزان رسوب در قطرچکان های مختلف به کاربرد. شکل (۵) مقادیر میانگین نسبت حجمی رسوب شبیه سازی شده توسط نرم افزار COMSOL در مجراهای ماریچ قطرچکان های مختلف در شرایط متفاوت را نشان می دهد. بر این اساس و برای تمامی نمونه ها و در هر دو شوری، با افزایش فشار آب ورودی از ۰/۵ تا ۲/۵ بار نسبت حجمی رسوب در حجم سیال به طور متوسط بیش از ۵۰ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، افزایش شوری از ۵ به ۱۲ دسی زیمنس بر متر نیز منجر به افزایش ۱۱۴ درصد نسبت حجمی رسوب به طور میانگین گردید. نتایج همچنین نشان داد که در بین نمونه های ۸ لیتر

ساختار قطره‌چکان پرسی و نتافیم بررسی کرد. نتایج جنبشی بینجامد، این افزایش انرژی از تجمع ذرات رسوبی و پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد اگر بهینه سازی ساختار ورود آب به گونه ای باشد که به افزایش سرعت و انرژی گرفتگی را کاهش می‌دهد (Yang et al., 2024).



شکل ۵- مقادیر میانگین نسبت حجمی رسوب شبیه سازی شده توسط نرم افزار COMSOL در مجراهای مارپیچ قطره‌چکان‌های مختلف.
Fig. 5- The average volumetric sediment ratio simulated using COMSOL software in Labyrinth Channels of various emitters.

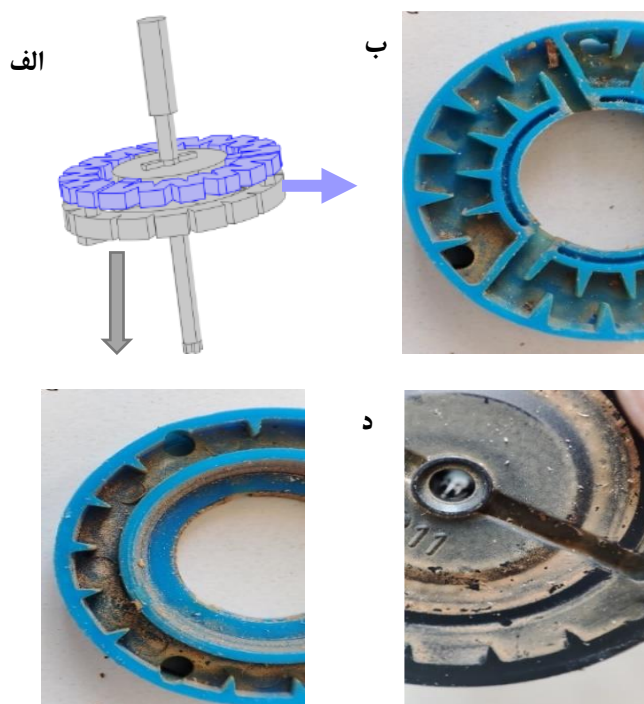
در مورد نشان تجاری پرسی، پرویزی و همکاران (Parvizi et al., 2025) نشان دادند که ساختار ورودی در نشان تجاری پرسی، نسبت به یورودریپ و نتافیم، سطح مقطع بیشتری دارد و بنابراین ورود جریان به آن با سرعت کمتری رخ خواهد داد و ریسک ته نشینی ذرات و در نتیجه گرفتگی آن افزایش می‌یابد.

در خصوص قطره‌چکان نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت، مجرای مارپیچ به گونه ای بود که ناحیه ته نشینی در زیر آن و پیش از ورود آب به مجرای مارپیچ اصلی وجود دارد. بنابراین مقادیر قابل توجهی از ذرات معلق موجود در سیال در این ناحیه ته نشین می‌شوند و به مجرای مارپیچ اصلی و ثانویه وارد نمی‌شوند. شکل (۶) ساختار ناحیه ته نشینی اولیه و تجمع رسوبات در این ناحیه را در این نوع قطره‌چکان نشان می‌دهد. در تطابق با این نتایج، وی و همکاران (Wei et al., 2008) در مقایسه توانایی سه قطره‌چکان مختلف در مواجهه با گرفتگی به این نتیجه رسیدند که قطره‌چکانی که دارای

مطالعه جریان و رسوب در مجرای مارپیچ قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار ...

مطرح شود این است که افزایش تعداد خروجی‌ها بر کاهش فشار و جریان اثر منفی ندارد، زیرا در محل خروج جریان همواره فشار با فشار اتمسفر برابر است، علاوه بر این حتی در صورت کاهش فشار به دلیل تعدد مجراها، در قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار میزان فشار ورودی توسط دیافراگم ارتجاعی پیش از ورود به مجرای مارپیچ همواره تنظیم و ثابت باقی می‌ماند.

مورد نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت مربوط به تعداد خروجی‌هاست که دارای سه خروجی جریان (مجرای مارپیچ سه تکه) در مقایسه با یورودیپ و پرسی با دو خروجی است. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که افزایش تعداد خروجی‌ها می‌تواند زمان ماندگاری ذرات جامد درون سیستم را در یک آبدهی مشخص به‌طور قابل توجهی کاهش دهد و از این طریق از ته نشینی و در نتیجه از انسداد مجرا جلوگیری کند (Kasa & Ramachandru, 2023). نکته‌ای که در اینجا لازم است



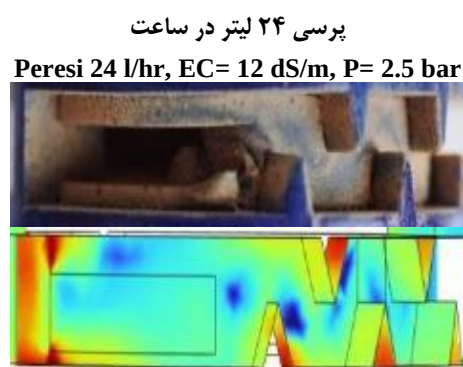
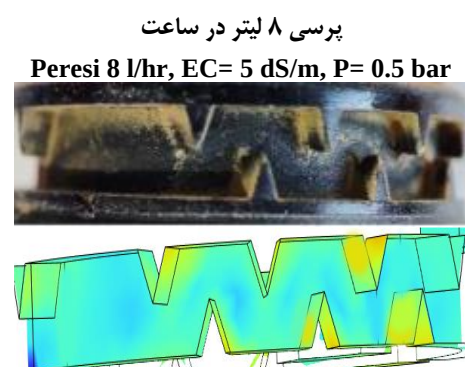
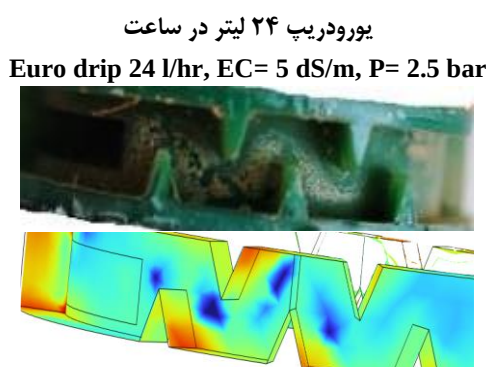
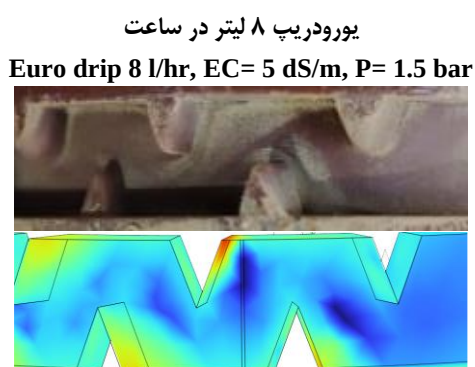
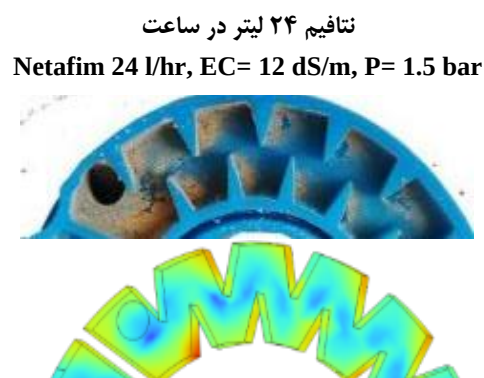
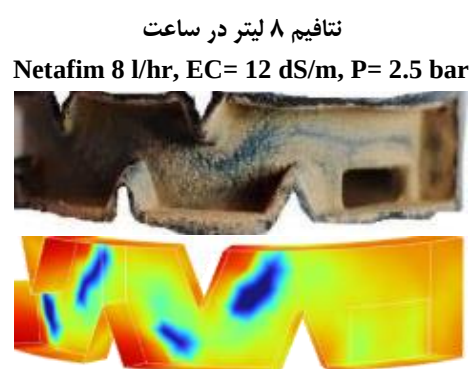
شکل ۶- ساختار نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت (الف) شامل ناحیه ته نشینی (ج) در زیر ناحیه مارپیچ (ب) و رسوب ذرات در زیر این ناحیه (د).

Fig. 6 - The structure of the Netafim 25 L/h emitter includes a settling zone (bottom left) located below the labyrinth zone (top right), with particle deposition occurring beneath this area (bottom right).

بطور کلی و مطابق انتظار، مقادیر رسوب بیشتر در و همکاران (Parvizi et al., 2025) که مربوط به همین قطره‌چکان‌هاست، نشان داد کاربرد فشارهای بالا منجر به افزایش ورود ذرات به درون مجراهای مارپیچ می‌شود و خطر انسداد را افزایش می‌دهد. لی و همکاران (Li et al., 2024) می‌گویند افزایش فشار کاری در محدوده‌ای مشخص می‌تواند عملکرد ضد گرفتگی قطره‌چکان پلاک‌دار با مجرای ستاره‌ای را بهبود بخشد. اما این فشار کاری نباید از فشار کارکرد معمول برای این نوع قطره‌چکان‌ها که حدود ۱ بار است، بیشتر باشد. فشار کارکرد قطره‌چکان‌های مورد بررسی در

پژوهش حاضر بین ۰/۵ تا ۴ بار است، اما مقایسه نتایج مدلسازی با پژوهش ذکر شده نشان می‌دهد افزایش فشار آب ورودی تا ۱/۵ بار منجر به افزایش ۲۰ درصد در میانگین حجم رسوبات می‌شود و افزایش این فشار تا ۲/۵ بار میانگین حجم رسوبات را تا ۴۶ درصد افزایش می‌دهد. شکل (۷) نتایج مربوط به شبیه‌سازی رسوب ذرات با روش CFD و

مقایسه آن با تصاویر واقعی در مجرای مارپیچ برخی از قطره‌چکان‌ها را نشان می‌دهد. این مجراها مهمترین بخش از قطره‌چکان‌ها می‌باشند و عبور آب از آن‌ها اتفاق می‌افتد. همچنین گرفتگی قطره‌چکان‌ها نیز معمولاً به دلیل رسوب ذرات در این مجراها رخ می‌دهد.



شکل ۷- میزان رسوب در مجرای مارپیچ در حالت شبیه‌سازی شده (چپ) و واقعی حاصل از تخریب قطره‌چکان‌های مختلف (راست) در شرایط متفاوت آزمایش. مقیاس رنگ‌ها برای نتایج شبیه‌سازی متفاوت هستند و نمی‌توان از آن برای مقایسه قطره‌چکان‌ها با یکدیگر استفاده کرد.

Fig. 7- The amounts of sediment deposition in the labyrinth channel in the simulated state (left) and the actual state resulting from the deterioration of various emitters (right) under different experimental conditions. The color scales for the simulation results differ and cannot be used to compare emitters with each other.

نتیجه‌گیری

خطر رسوب‌گذاری را افزایش می‌دهد. بنابراین پیشنهاد می‌گردد برای کاهش ریسک گرفتگی، از قطره‌چکان‌هایی استفاده شود که دارای گوشه‌های اصلاح شده به شکل منحنی، به جای تیز، هستند. بهبود و اصلاح ساختارهای گوشه‌ای تیز می‌تواند توسط سازندگان مدنظر قرار گیرد. از سوی دیگر، استهلاک فشار در قطره‌چکان‌های دارای دندانه‌های متعدد بهتر پیش می‌رود و احتمالاً عملکرد آن‌ها در برابر گرفتگی مطلوب‌تر است. به علاوه، می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از CFD، بررسی مدیریت‌های مختلف فشار جریان و شوری در سامانه‌های آبیاری تحت فشار با سرعت و هزینه پایین امکان‌پذیر است و CFD می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای مدلسازی جریان سیال و طراحی بهینه قطره‌چکان‌های جدید که منجر به کاهش خطر انسداد و در نتیجه بهبود عملکرد آن‌ها در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای می‌شود، استفاده شود و به کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و تولید کمک کند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای پژوهش‌های آینده برای بهینه‌سازی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای در شرایط متنوع محیطی باشد.

در این پژوهش، تغییرات رسوب شبیه‌سازی شده توسط مدل و رسوب واقعی در قطره‌چکان‌های مختلف تطابق بالایی را نشان داد، اما مدل در تخمین نتایج واقعی دارای کم‌برآورد قابل توجه و به میزان ده برابر کمتر بود که ناشی از تجمع رسوبات طی زمان در واقعیت است. مشاهده شد که قطره‌چکان‌هایی که دارای ناحیه ته‌نشینی اولیه هستند، عملکرد ضدگرفتگی بهتری دارند زیرا بخش قابل توجهی از ذرات معلق پیش از ورود به مجرای ماریچ ته‌نشین می‌شوند. افزایش تعداد خروجی‌های جریان منجر به کاهش زمان ماند ذرات درون مجرا و کاهش خطر گرفتگی می‌شود. به طور کلی شوری بالاتر و افزایش فشار جریان ورودی موجب افزایش تجمع رسوبات می‌شود که می‌تواند ریسک گرفتگی را افزایش دهد. نتایج این پژوهش نشان داد که هندسه مجرای ماریچ قطره‌چکان‌ها تأثیری مستقیم بر الگوی جریان و گرفتگی دارد. دندانه‌های مجرای ماریچ موجب افزایش سرعت و کاهش تجمع رسوبات می‌شوند، اما در گوشه‌ها و مناطق گردابی سرعت جریان کاهش می‌یابد که این موضوع

منابع

- Baghel, Y. K., Kumar, J., & Patel, V. K. (2021). CFD analysis of the flow characteristics of in-line drip emitter with different labyrinth channels. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 102, 111-119.
- Camargo, A. P. D., Muniz, G. L., Cano, N. D., Ait-Mouheb, N., Tomas, S., Pereira, D.J.D.S., Lavanholi, R., Frizzzone, J.A. and Molle, B. (2020). Applications of computational fluid dynamics in irrigation engineering. *Revista Ciência Agronômica*, 51(spe), e20207700.
- Celik, H. K., Karayel, D., Caglayan, N., Rennie, A. E., & Akinci, I. (2011). Rapid prototyping and flow simulation applications in design of agricultural irrigation equipment: case study for a sample in-line drip emitter: the paper is to study CFD and RP application samples on the design issues associated with agricultural irrigation equipment. *Virtual and Physical Prototyping*, 6(1), 47-56.
- Dazhuang, Y., Peiling, Y., Shumei, R., Yunkai, L., & Tingwu, X. (2007). Numerical study on flow property in dentate path of drip emitters. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 50(5), 705-712.
- Delghandi, M., Behzad, M. and Broomandnasab, S. (2010). Analysis of hydraulic flow characteristics in small emitter channels by using FLUENT software. *Water and Soil*, 24(4), -. doi: 0.22067/jsw.v0i0.3891(in Persian)

- Delghandi, M., Saghi, H., & Broomandnasab, S. (2013). Performance computational fluid dynamics software tools in determination emitters outflow. *Iranian Journal of Irrigation and drainage*, 6(4), 245-253 (in Persian).
- De Marchis, M., Bruno, F., Saccone, D., & Napoli, E. (2025). Performance of Emitters in Drip Irrigation Systems Using Computational Fluid Dynamic Analysis. *Water*, 17(5), 689.
- Demir, V., Yürdem, H., Yazgı, A., & Günhan, T. (2020). Determination of the hydraulic properties of a flat type drip emitter using computational fluid dynamics. *Journal of Agricultural Sciences*, 26(2), 226-235.
- Fan, J., Jiajie, O., Yijun, W., & Zhongmin, X. (2014). Research Article Emitter Design and Numerical Simulation Based on the Extenics Theory. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 6(5), 568-573.
- Kasa, R. R., & Ramachandrula, V. R. (2023). Hydraulic and Anti-clogging Performance Evaluation of a Novel Cylindrical Drip Emitter using CFD Techniques. *CVR Journal of Science and Technology*, 24(1), 1-6.
- Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1983). The numerical computation of turbulent flows. In *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion* (pp. 96-116). Pergamon.
- Li G.Y., Wang G.D., Alam M., Zhao Y.F. 2006. Influence of geometrical parameters of labyrinth flow path of drip emitters on hydraulic and anti-clogging performance. *ASAE*. 49(3): 637-643.
- Li, Y., Feng, X., Han, X., Sun, Y., & Li, H. (2024). Analysis of anti-clogging performance and particle transport characteristics of a stellate irrigation emitter. *Biosystems Engineering*, 242, 50-66.
- Qin, C., Zhang, J., Wang, Z., Lyu, D., Liu, N., Xing, S., & Wang, F. (2022). Anti-Clogging Performance Optimization for Shunt-Hedging Drip Irrigation Emitters Based on Water–Sand Motion Characteristics. *Water*, 14(23), 3901.
- Ouarriche, H., El Bouhali, M., Bouisfi, F., Bouziane, A., Zouine, A., Assoudi, R., & Chaoui, M. (2023). Numerical simulation of clogging of two types of emitters with similar properties. *World Water Policy*, 9(4), 729-736.
- Parvizi, H., Hatami, H., Parnian, A., Rahimian, M. H. and Beyrami, H. (2025). Effect of Increasing Operating Pressure and Water Salinity on the Performance of Some Common Pressure Compensating Emitters. *Journal of Water Research in Agriculture*, 38(4), 375-395. doi: 10.22092/jwra.2024.366784.1052
- Seo, B. H., Lee, S., Lee, J. H., Kim, D. S., Seo, Y. J., Kim, D. W., & Choi, W. (2024). Efficient two-way fluid–structure interaction simulation for performance prediction of pressure-compensating emitter. *Biosystems Engineering*, 244, 53-66.
- Wei, Q., Shi, Y., Dong, W., Lu, G., & Huang, S. (2006). Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics. *Agricultural Water Management*, 84(1-2), 130-136.
- Wei, Q. S., Gang, L., Jie, L., Yusheng, S., Wenchu, D., & Shuhuai, H. (2008). Evaluations of emitter clogging in drip irrigation by two-phase flow simulations and laboratory experiments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63(2), 294-303.
- Wei, Z., Cao, M., Liu, X., Tang, Y., & Lu, B. (2012). Flow behavior analysis and experimental investigation for emitter micro-channels. *Chinese journal of mechanical engineering*, 25(4), 729-737.
- Yang, B., Wang, J., Zhang, Y., Wang, H., Ma, X., & Mo, Y. (2020). Anti-clogging performance optimization for dentiform labyrinth emitters. *Irrigation Science*, 38, 275-285.
- Yang, B., Wang, F., Wang, J., Wang, C., & Qiu, X. (2024). Numerical simulation and optimization of the inlet structure of dentiform emitters in drip-irrigation systems. *Biosystems Engineering*, 246, 183-190.

- Yu, L., Li, N., Long, J., Liu, X., & Yang, Q. (2018). The mechanism of emitter clogging analyzed by CFD–DEM simulation and PTV experiment. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(1), 1687814017743025.
- Zhang, W., Wang, Z., Cheng, S., Dong, A., Zhang, E., & Niu, W. (2022). Anti-clogging ability of the labyrinth emitter and its evaluation method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 15(6), 80-90.