



## Comparison of Hydrodynamic Performance of Three Types of Static Mixers Using Computational Fluid Dynamics and Artificial Neural Network

R. Amani<sup>1</sup>, R. Beigzadeh<sup>2\*</sup>

1- M. Sc. in Chemical Engineering, University of Kurdistan

2- Assistant Professor of Chemical Engineering, University of Kurdistan

Email: r.beigzadeh@uok.ac.ir

### Abstract

Static mixers are applied for increasing the mixing in chemical reactors as well as for increasing the heat transfer coefficient in heat exchangers. In the study, fluid flow characteristics in tubes equipped with modified static mixers with different geometric parameters were investigated by computational fluid dynamics. The classic twisted tape, perforated twisted tape, and V-Cut twisted tape were evaluated for Reynolds numbers between of 3000 to 19000. The fluid flow and pressure drop for the mixers were investigated. The validated simulation results were employed to train the artificial neural network model. Reynolds number and geometric parameters of the mixers were used as input variables of the neural network for predicting the friction factor. The model accuracy for estimating the friction factor was investigated and a relative error of less than 1% was obtained. The main relative errors for all data in classical, V-Cut, and perforated twisted tape were 0.75%, 0.57%, and 0.52%, respectively, and for validation data were 1.1%, 0.92%, and 0.62%. 30% of the data were randomly selected for the neural network to prove the model validity.

Received: 6 February 2021

Accepted: 13 June 2021

Page Number: 94-109

### Keywords:

Static Mixers,  
Friction Factor,  
Twisted Tape,  
Computational Fluid Dynamics,  
Artificial Neural Network

### Please Cite this Article Using:

Amani, R., Beigzadeh, R., "Comparison of Hydrodynamic Performance of three Types of Static Mixers Using Computational Fluid Dynamics and Artificial Neural Network", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 20, No. 117, pp. 94-109, In Persian, (2021).



## مقایسه عملکرد هیدرودینامیکی سه نوع همزن استاتیکی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و شبکه عصبی مصنوعی

راشد امانی<sup>۱</sup>، رضا بیگزاده<sup>\*۲</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه کردستان

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه کردستان

پیام نگار: r.beigzadeh@uok.ac.ir

### چکیده

همزن‌های استاتیک تجهیزاتی برای آمیزش در راکتورهای شیمیایی و افزایش ضریب انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی هستند. در این تحقیق مشخصه‌های جریان سیال در لوله‌های مجهز به همزن‌های استاتیکی اصلاح‌شده با ابعاد هندسی متفاوت با روش شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شده است. همزن‌های نواری پیچیده کلاسیک، نواری پیچیده حفره‌دار و نواری پیچیده V-Cut برای اعداد رینولدز ۳۰۰ تا ۱۹۰۰۰ بررسی شدند. الگوی جریان و افت فشار برای جریان سیال بر روی این همزن‌ها بررسی شد. همچنین پس از تأیید اعتبار نتایج شبیه‌سازی، داده‌های به‌دست‌آمده برای آموزش مدل شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. عدد رینولدز و مؤلفه‌های هندسی همزن‌ها به‌عنوان متغیرهای ورودی شبکه عصبی برای تخمین ضریب اصطکاک استفاده شدند. کارایی مدل‌ها در تخمین ضریب اصطکاک ارزیابی شد که نتایج بیانگر خطای نسبی کمتر از ۱ درصد است. خطای نسبی برای کلیه داده‌ها در حالت کلاسیک، V-Cut و حفره‌دار به‌ترتیب ۰/۷۵٪، ۰/۵۷٪ و ۰/۵۲٪ و برای داده‌های ارزیابی به‌ترتیب ۱/۱٪، ۰/۹۲٪ و ۰/۶۲٪ به دست آمد. ۳۰ درصد داده‌ها به‌طور تصادفی برای ارزیابی شبکه عصبی در نظر گرفته شد که دقت بالای تخمین آن‌ها اعتبار مدل را اثبات می‌کند.

### کلیدواژه‌ها:

همزن استاتیک،  
ضریب اصطکاک،  
نواری پیچیده،  
دینامیک سیالات محاسباتی،  
شبکه عصبی مصنوعی

\* کردستان، سنجند، دانشگاه کردستان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

امانی، ر.، بیگزاده، ر.، "مقایسه عملکرد هیدرودینامیکی سه نوع همزن استاتیکی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و شبکه عصبی مصنوعی"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیستم، شماره ۱۱۷، صص. ۹۴-۱۰۹، (۱۴۰۰).

## ۱. مقدمه

همزن‌های استاتیک از اجزای ساکن متعددی که در یک لوله یا کانال ثابت نصب شده‌اند، تشکیل شده است. هدف این تجهیزات تقسیم، چرخش و سپس ترکیب مجدد جریان‌های ورودی است. از آنجایی که در همزن‌های استاتیک هیچ قسمت متحرکی وجود ندارد، تنها توان مورد نیاز از پمپ خارجی، برای غلبه بر افت فشار تولید شده از عناصر اختلاط و حرکت سیال است [۱]. اختلاط نادرست می‌تواند منجر به کیفیت پایین‌تر محصولات و در نتیجه نیاز به سامانه‌های جداسازی پیشرفته‌تر شود که به نوبه خود هزینه‌های مدیریت پسماند را افزایش می‌دهد؛ بنابراین آمیختن، به عنوان یک عمل مداوم در همزن‌های استاتیک انجام می‌شود [۲]. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) <sup>۱</sup> ابزاری اساسی و مهم در پیش‌بینی دینامیک سیال، انتقال حرارت و انتقال جرم و همچنین سرعت بخشیدن به طراحی تجهیزات و به‌دست‌آوردن درک اساسی از روند مخلوط کردن است که در صنایع مختلف به کار می‌رود [۳، ۴]. بنابراین، CFD می‌تواند با موفقیت در طراحی و تجزیه و تحلیل تجهیزاتی مانند همزن‌های استاتیک استفاده شود. همچنین شبکه‌های عصبی مصنوعی با استفاده از تعداد زیادی از مؤلفه‌ها (وزن و بایاس) قادراند داده‌های هدف را در تجهیزات مهندسی - با دقت بالا - تخمین بزنند.

لیو و همکاران [۵] و باومن و همکاران [۶] به ترتیب مطالعات عددی و تجربی را برای اندازه‌گیری افت فشار در همزن‌های استاتیک SMX انجام دادند. بسیاری از مطالعات در مورد طراحی همزن‌های استاتیک جدید یا اصلاح همزن‌های استاتیک موجود در مقیاس آزمایشگاهی مربوط به جریان‌های آرام که در آن تأثیر عواملی مانند تیغه، شکل، تعداد عناصر و سایر عوامل طراحی به‌وسیله ابزارهای عددی ارزیابی شده است وجود دارد [۷-۱۱]. سینگ و همکاران [۱۲] مؤلفه‌های مختلف طراحی همزن‌های SMX، یعنی  $N_p$  (تعداد میله‌های عرضی در هر عنصر) و  $N_x$  (تعداد میله‌های طولی در هر عنصر) به‌وسیله CFD تجزیه و تحلیل و متعاقباً بهینه‌سازی شد.

داگدور و اوزیهان [۱۳] به بررسی افزایش انتقال حرارت با استفاده از همزن‌های نواری پیچ‌خورده اصلاح شده (ساده، حفره‌دار و مورب) در مقادیر متفاوت نسبت حجمی اتیلن گلیکول و آب پرداختند. مشخص شد که استفاده از همزن نواری پیچ‌خورده حفره‌دار در مقایسه

1. Computational Fluid Dynamics

با نواری مورب و ساده عملکرد انتقال حرارت بهتری دارد. همچنین افزایش مقدار اتیلن گلیکول در آب، بر عملکرد انتقال حرارت تأثیر منفی می‌گذارد. نیز استفاده از همزن‌های نواری پیچ‌خورده به‌طور چشمگیری ضریب اصطکاک را افزایش می‌دهند، درحالی‌که مقدار اتیلن گلیکول در مخلوط، تأثیر چشمگیری بر ضریب اصطکاک در همان عدد رینولدز ندارد.

کمار و همکاران [۱۴] به بررسی عملکرد حرارتی یک همزن نواری پیچ‌خورده حفره‌دار مثلی شکل با برش ۷ در مبدل حرارتی دو لوله پرداختند و نتایج حاصل را با همزن نواری پیچ‌خورده ساده مقایسه کردند؛ آن‌ها دریافتند که همزن مورد بررسی عملکرد حرارتی بهتری را نشان می‌دهد؛ زیرا جریان چرخشی بهتری را ایجاد می‌کند که به اختلاط بهتر مایع در نزدیکی دیواره‌ها و منطقه مرکز لوله کمک می‌کند.

همزن‌های استاتیک موجب افزایش آشفتگی جریان و در نتیجه افزایش اختلاط و انتقال حرارت می‌شوند. با این حال وجود این همزن‌ها در کانال منجر به افزایش افت فشار و نیروی پمپاژ می‌شود که ضرورت بررسی این مورد را نشان می‌دهد. در این سامانه‌ها توسعه مدل‌هایی مانند شبکه عصبی مصنوعی که قابلیت پیش‌بینی بالایی دارند می‌تواند بسیار مفید باشد. در این تحقیق سه همزن نواری پیچیده کلاسیک، حفره‌دار و V-Cut به کمک شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بررسی و تحلیل شدند. در آخر با به‌کارگیری نتایج شبیه‌سازی CFD، سه مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک آموزش داده شد. شبکه عصبی مصنوعی برای این که دقت بالایی در پیش‌بینی نتایج داشته باشد، نیازمند داده‌های زیادی برای آموزش است؛ به همین دلیل، از داده‌های حاصل از شبیه‌سازی CFD به‌عنوان ورودی شبکه عصبی استفاده شد، که تعداد داده زیادی را فراهم می‌آورد. این امر علاوه بر ایجاد یک مدل شبکه عصبی دقیق، موجب نیازی از داده‌های آزمایشگاهی می‌شود و کاهش هزینه‌ها را نیز به دنبال دارد.

## ۲. مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی

شکل (۱) ابعاد هندسی همزن استاتیک بررسی شده را نشان می‌دهد. در این شکل W قطر همزن استاتیک، H طول یک عنصر اختلاط یا فاصله مرکز تا مرکز دو عنصر اختلاط و D قطر لوله است. در این

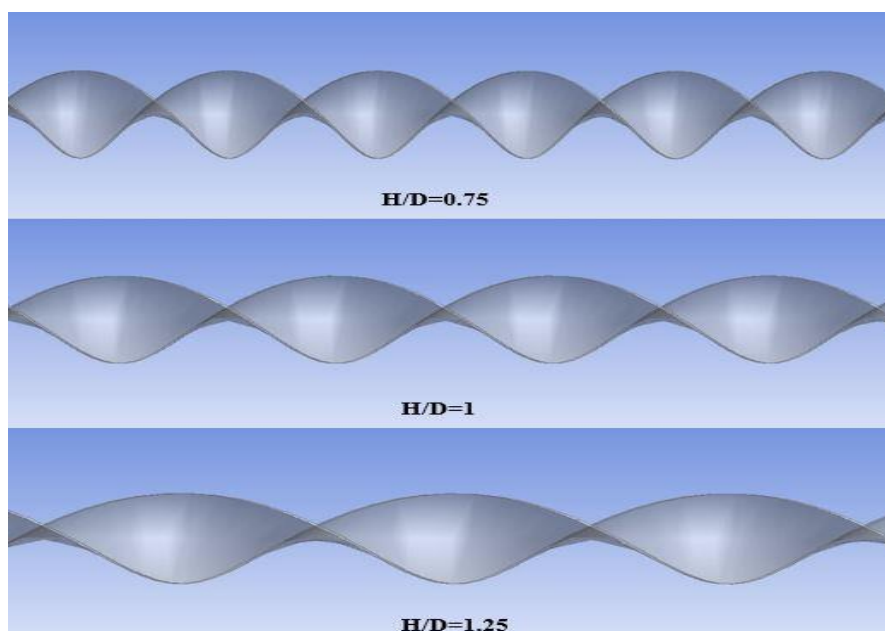
پیچیده حفره دار مورد بررسی را نشان می دهد. در شکل (۳)،  $W$  قطر همزن،  $d$  قطر حفره ایجاد شده در همزن و  $s$  فاصله مرکز یک حفره تا مرکز حفره بعدی است. در همزن حفره دار به بررسی سه نسبت فاصله  $(s/W)$  ۱،  $1/5$  و ۲ و همچنین هفت نسبت قطر  $(d/W)$  ۰/۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ پرداخته شده است.

مطالعه سه طول پیچش  $(H/D)$  دارای مقادیر ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ و همچنین سه نسبت قطر  $(W/D)$  دارای مقادیر ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ و بررسی شدند. به این ترتیب ۹ همزن نواری پیچیده کلاسیک طراحی شد. شکل (۲) همزن های نواری پیچیده کلاسیک را در نسبت قطر ۰/۸ برای نسبت های پیچش مختلف نشان می دهد. شکل (۳) نواری



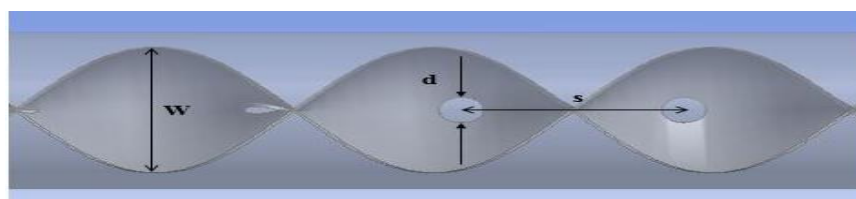
شکل ۱. ابعاد همزن نواری پیچیده کلاسیک.

Figure 1. Dimensions of the classical twisted tape.



شکل ۲. طول پیچش های مختلف همزن نواری پیچیده کلاسیک در نسبت قطر ۰/۸.

Figure 2. Classical twisted tapes with different pitches in the ratio of 0.8.



شکل ۳. ابعاد همزن نواری پیچیده حفره دار.

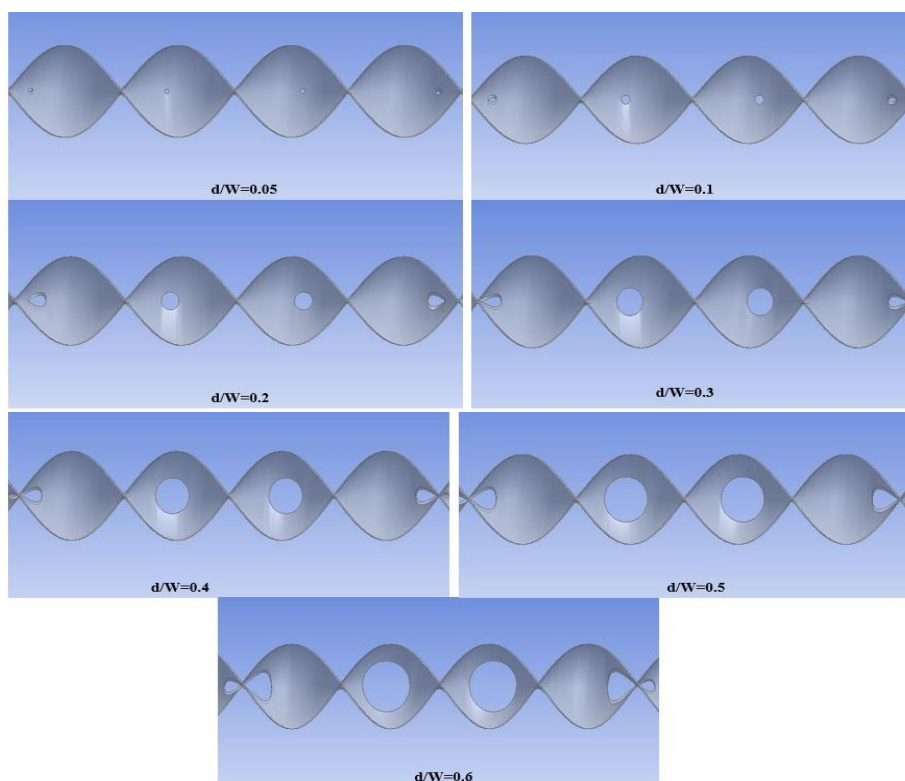
Figure 3. Dimensions of the perforated twisted tape.

در شکل (۴) هفت همزن استاتیکی با قطر حفره‌های مختلف برای حالت نسبت فاصله ۱/۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل بیشترین نسبت قطر ۰/۶ است و افزایش نسبت قطر منجر به از بین رفتن پره‌های مارپیچی همزن خواهد شد و سامانه به سمت حالت لوله بدون همزن خواهد رفت.

در شکل (۵) همزن V-Cut و ابعاد هندسی مورد بررسی آن نشان داده شده است. برای همزن V-Cut، قطر همزن،  $w$  پهنای برش و  $d_e$  ارتفاع یا عمق برش است؛ برای این همزن سه نسبت پهنای

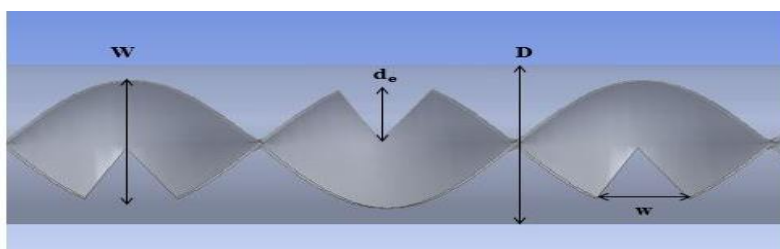
برش ( $w/W$ ) دارای مقادیر ۰/۳۵ و ۰/۴۵ و ۰/۵۵ و سه نسبت عمق برش ( $d_e/W$ ) دارای مقادیر ۰/۳ و ۰/۴ و ۰/۵ بررسی شدند؛ به این ترتیب در مجموع ۹ همزن V-Cut طراحی شد.

شکل (۶) همزن‌های V-Cut را برای نسبت پهنای برش ۰/۳۵ و ۰/۴۵ و ۰/۵۵ با نسبت عمق ثابت ۰/۵ نشان می‌دهد. درواقع با افزایش نسبت پهنای برش، قاعده مثلث افزایش می‌یابد و موجب بزرگ‌تر شدن برش خواهد شد.



شکل ۴. همزن‌های نواری پیچیده حفره‌دار برای نسبت فاصله ۱/۵ و قطر حفره متفاوت.

Figure 4. Perforated twisted tapes with the ratio of 1.5 and different cavity diameters.

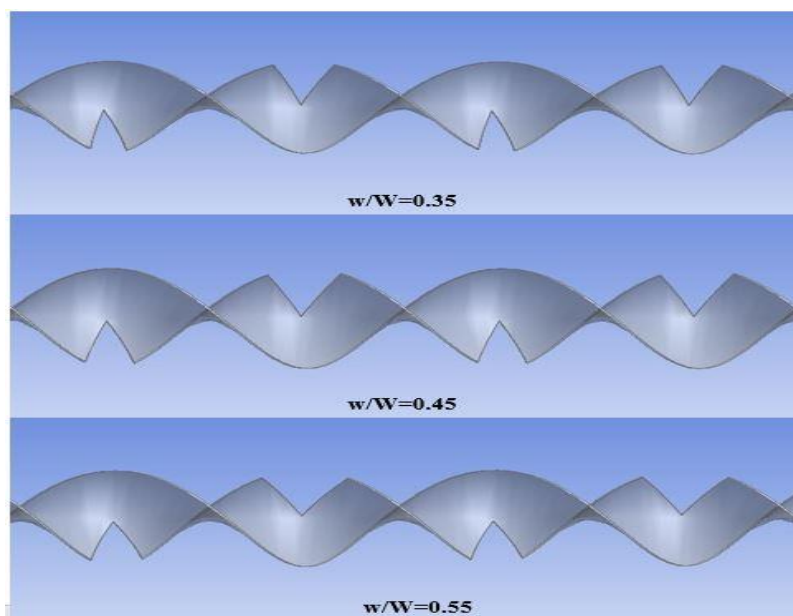


شکل ۵. ابعاد همزن نواری پیچیده V-Cut.

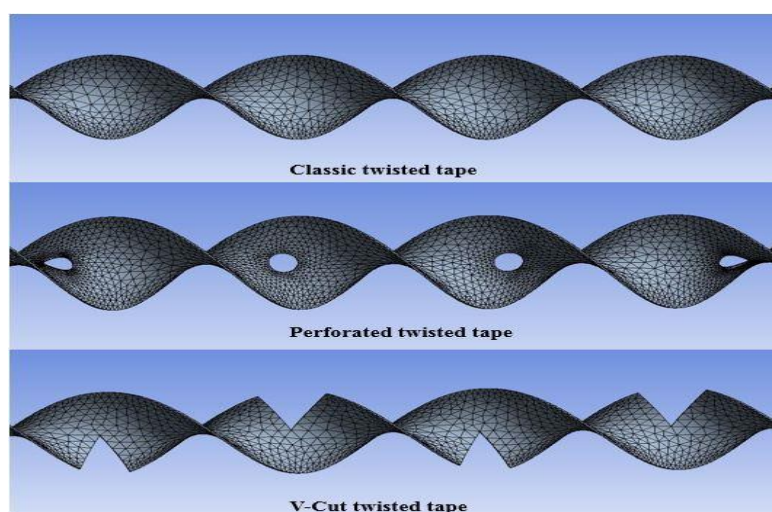
Figure 5. Dimensions of the V-Cut twisted tape.

بدین منظور، با تعریف اندازه مش مناسب در نزدیکی دیواره‌ها، حفره‌ها و اطراف برش‌ها مش‌بندی با یک روند افزایشی در اندازه مش در این نقاط انجام شد. شکل (۷) مش‌بندی همزن‌های نواریپیچیده کلاسیک، حفره‌دار و V-Cut را نشان می‌دهد. با توجه به پیچیدگی هندسه‌های مورد بررسی، مش‌بندی مناسب از نوع چهاروجهی با مش‌های غیرمنظم انتخاب شد.

یکی از مراحل مهم در فرایند شبیه‌سازی به روش CFD، مش‌بندی سامانه مورد بررسی است. کیفیت و اندازه شبکه‌ها بسیار حائز اهمیت است؛ در همزن‌های مورد نظر با توجه به این‌که شدت تغییرات سرعت در نزدیکی دیواره‌ها، حفره‌ها و برش‌های ایجاد شده بیشتر است و به‌دقت بالاتر محاسبات در این نواحی نیاز است، مش‌بندی در این نقاط به‌صورت ریزتر و با تراکم بیشتر انجام شد.



شکل ۶. نسبت پهناهای مختلف برش همزن نواریپیچیده V-Cut با نسبت عمق ثابت ۰/۵.  
Figure 6. Ratio of different cutting widths of V-Cut twisted tape with constant depth ratio of 0.5.



شکل ۷. مش‌بندی همزن‌های نواریپیچیده کلاسیک، حفره‌دار و V-Cut.

Figure 7. Mesh of the classic, perforated, and V-Cut twisted tape mixer.

فشار خروجی هستند. فشار خروجی برابر فشار اتمسفری در نظر گرفته شد. شرایط عملیاتی فشار نسبی صفر برای سامانه به کار رفت. الگوریتم SIMPLE برای رابطه فشار و سرعت استفاده شد. معادله فشار از تکنیک استاندارد و معادله مومنتوم از تکنیک حل درجه دوم حل شدند. حل معادلات و انجام محاسبات شروع می شود و محاسبات تا زمان همگرایی نتایج ادامه خواهد یافت. معیار سنجش همگرایی نتایج در فرایند مدل سازی، مقدار خطای کمتر از  $10^{-5}$  در نظر گرفته شد.

استقلال از مش یکی از مراحل با اهمیت در مدل سازی CFD است. بدین منظور افت فشار به دست آمده از شبیه سازی برای همزن نوار پیچیده کلاسیک (نسبت پیچش ۱ و نسبت قطر ۰/۸) برای مش های مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است. طبق شکل برای مش های بیشتر از ۶۰۵۸۵۵ تغییر چشم گیری در افت فشار به دست آمده مشاهده نشد و تعداد مش ۶۰۵۸۵۵ به عنوان مش بهینه انتخاب شد. همچنین برای باقی همزن ها نیز مش بندی در محدوده ۶۰۰۰۰ تا ۶۸۰۰۰ تعیین شد. تغییرات کمتر از یک درصد برای افت فشار به عنوان معیار اندازه مش بهینه قرار گرفته شد و برای مرحله بعد از تعداد مش بهینه ۶۰۵۸۵۵ افت فشار کمتر از ۱٪ تغییر کرد.

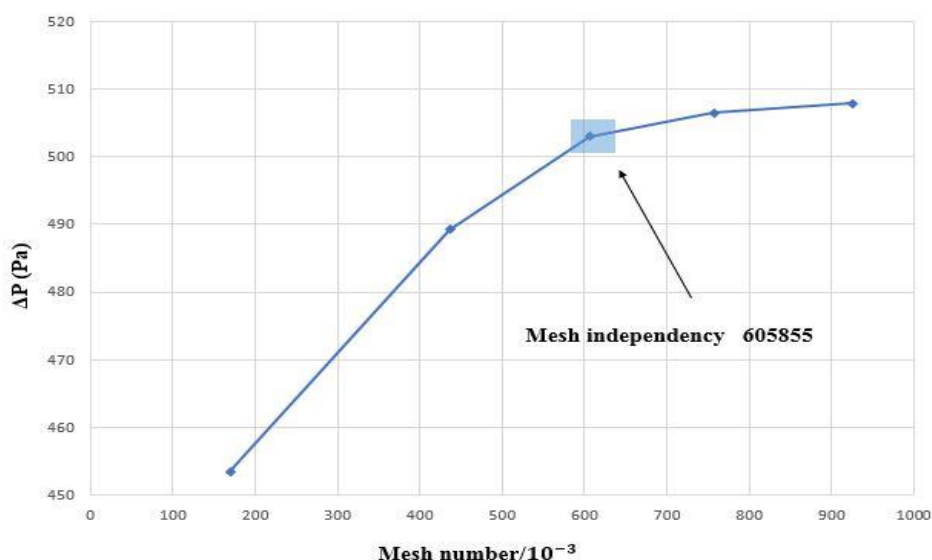
معادلات پیوستگی و حرکت با استفاده از روش حجم محدود حل می شوند؛ معادلات ذکر شده به شرح زیر بیان می شوند:

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

و معادله مومنتوم یا حرکت:

$$\nabla(\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu \nabla \mathbf{V}] + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

در این معادلات  $\mu, \rho, \mathbf{g}, \mathbf{V}, P$  به ترتیب فشار، بردار سرعت متوسط، بردار شتاب جاذبه، چگالی و گرانروی دینامیکی هستند. فرضیات کلی مدل مورد استفاده عبارت است از: جریان تک فاز، حالت پایدار، سیال غیرقابل تراکم، هم دما و بدون هیچ گونه واکنشی. سیال مورد نظر آب با جرم ویژه  $998/2 \text{ kg/m}^3$  و گرانروی دینامیکی  $0/001003 \text{ kg/(m.s)}$  در نظر گرفته شد. با توجه به محدوده عدد رینولدز (۳۰۰۰-۱۹۰۰۰) رژیم جریان آشفته فرض شد. معادلات به وسیله نرم افزار برای سیال آب، حل و شرایط مرزی لازم برای سامانه تعریف شدند. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای ورودی و خروجی جریان سیال در لوله، به ترتیب سرعت ورودی و



شکل ۸. استقلال از مش بندی سامانه.

Figure 8. Mesh independency.

### ۳. مدل سازی شبکه عصبی مصنوعی

شبکه های عصبی با به کارگیری تعداد زیادی از مؤلفه های خود قادر به پیش بینی توابع پیچیده و غیر خطی هستند؛ این مدل ها از یک لایه ورودی و یک لایه خروجی و همچنین یک یا چند لایه مخفی یا پنهان تشکیل شده اند که هر کدام چندین نرون دارند. از نظر تئوری، مدل شبکه عصبی مصنوعی سه لایه با تعداد نرون های مناسب در لایه پنهان (میانی) می تواند به تخمین تقریباً هر عملکرد غیر خطی بپردازد [۱۵]. با این حال، گاهی اوقات استفاده از لایه های پنهان بیشتر منجر به پیش بینی دقیق تری خواهد شد. نرون هایی که در هر لایه وجود دارند به نرون ها در لایه مجاور متصل اند و قدرت این اتصالات با توجه به مقدار وزن ها تعیین می شود. این اتصالات به هم پیوسته در نهایت منجر به ارتباط منطقی بین ورودی و خروجی می شوند. در شبکه عصبی سیگنال ها به وسیله اتصالات نرون ها در لایه های مجاور انتقال داده می شوند. در پایان خروجی شبکه عصبی مصنوعی با رابطه زیر به دست می آید:

$$Y = F_p \left\{ \sum_{j=1}^n W_{kj} [F_t (\sum_{i=1}^m W_{ji} X_i + b_j)] + b_k \right\} \quad (3)$$

در این رابطه Y پاسخ نهایی مدل، X ورودی مدل، W وزن، b بایاس، n تعداد نرون هایی که در لایه پنهان وجود دارند، m تعداد متغیرهای ورودی ها و i, j, k هر کدام به لایه های ورودی، پنهان و خروجی مرتبط هستند. F تابع تبدیل شبکه است که برای نرمالیزه کردن داده های خروجی هر نرون مور به کار می رود.

تعداد نرون های موجود در لایه های ورودی و خروجی یک شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب با توجه به متغیرهای ورودی و خروجی تعیین می شود ولی در لایه پنهان تعداد مختلفی نرون می تواند وجود داشته باشد که تعیین تعداد آن موضوع بسیار مهمی در فرایند مدل سازی است. تابع تبدیل تانژانت هایپربولیک سیگموئید برای نرمالیزه کردن لایه پنهان و از تابع خطی برای لایه خروجی استفاده شد، توابع نامبرده به صورت زیر تعریف می شوند:

$$F_t(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (4)$$

$$F_p(x) = x \quad (5)$$

به طور کلی روشی برای به دست آوردن تعداد بهینه نرون ها در لایه میانی قبل از آموزش شبکه عصبی مصنوعی موجود نیست. تعداد زیاد نرون ها اگرچه می تواند باعث افزایش دقت در داده های آموزشی شود، ممکن است باعث پدیده ای به نام حفظ کردن داده ها به وسیله مدل شود. این پدیده زمانی رخ می دهد که مدل ایجاد شده خیلی پیچیده شود (منظور افزایش تعداد وزن ها و بایاس هاست). در این حالت مدل امکان پیش بینی داده هایی غیر از داده های آموزشی را نخواهد داشت [۱۶]. در این تحقیق برای تعیین تعداد بهینه نرون ها روش سعی و خطا به کار رفته است. در این روش تعداد مختلفی از نرون های پنهانی، استفاده و در پایان تعداد نرون مناسب برای مدل تعیین می شود. فرمول های به کار رفته برای تعیین خطا عبارت اند از: متوسط خطای نسبی (MRE)، متوسط مربع خطا (MSE)، مجموع خطای مربع (SSE) و کسر مطلق واریانس ( $R^2$ ) که به صورت زیر حساب می شوند:

$$MRE(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{|t_i - y_i|}{t_i} \right) \quad (6)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2 \quad (7)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2 \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (t_i)^2} \quad (9)$$

در معادلات N تعداد داده ها، t داده هدف (شبیه سازی)، و y داده پیش بینی شده است. برای تعیین وزن ها و بایاس ها و آموزش شبکه عصبی مصنوعی از تکنیک آموزشی پس انتشار خطا به شیوه لونبرگ-مارکورت [۱۹-۱۷] که یکی از دقیق ترین شیوه ها است- استفاده شد. از مجموع داده های شبیه سازی شده، ۷۰ درصد داده ها برای آموزش مدل و باقی مانده آن ها برای ارزیابی و صحت سنجی شبکه عصبی استفاده شد و در آخر اعتبار مدل هنگامی تعیین می شود که قادر باشد داده هایی را هم که در آموزش آن شرکت نکرده اند با دقت مناسبی پیش بینی کند. ۳۰ درصد داده های

شبیه‌سازی شده (با روش CFD) برای ارزیابی مدل استفاده شدند. با مقایسه خطای نسبی داده‌های آموزش و ارزیابی به اعتبار مدل پی برده می‌شود.

#### ۴. بحث و بررسی نتایج

##### ۴-۱ نتایج دینامیک سیالات محاسباتی

برای تحلیل ساده‌تر افت فشار سیال درون لوله‌ها، نتایج شبیه‌سازی CFD به صورت اعداد بدون بعد ارائه شد. عدد بدون بعد رینولدز با به‌کارگیری معادله زیر قابل محاسبه است:

$$Re = \rho V D / \mu \quad (10)$$

در اینجا  $\rho$  چگالی سیال،  $V$  سرعت سیال،  $\mu$  گرانروی دینامیک و  $D$  قطر لوله است. برای تحلیل هیدرودینامیک سیال در طول همزن‌های نواریپیچیده از عدد بدون بعد ضریب اصطکاک استفاده می‌شود:

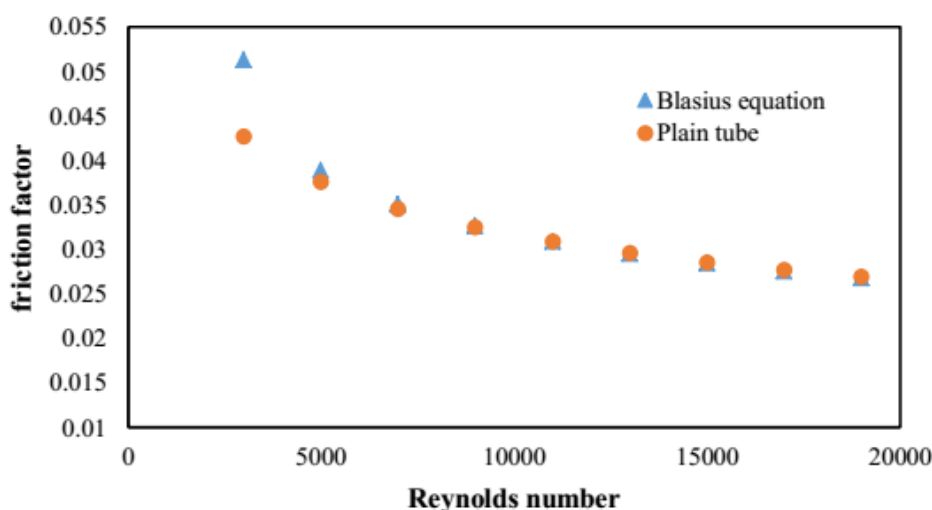
$$f = \frac{2 \Delta P D}{\rho V^2 L} \quad (11)$$

در اینجا  $\Delta P$  افت فشار سیال و  $L$  طول لوله است. برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، از مقایسه نتایج لوله ساده با رابطه بلاسیوس

استفاده شد. رابطه بلاسیوس با فرمول زیر تعریف می‌شود:

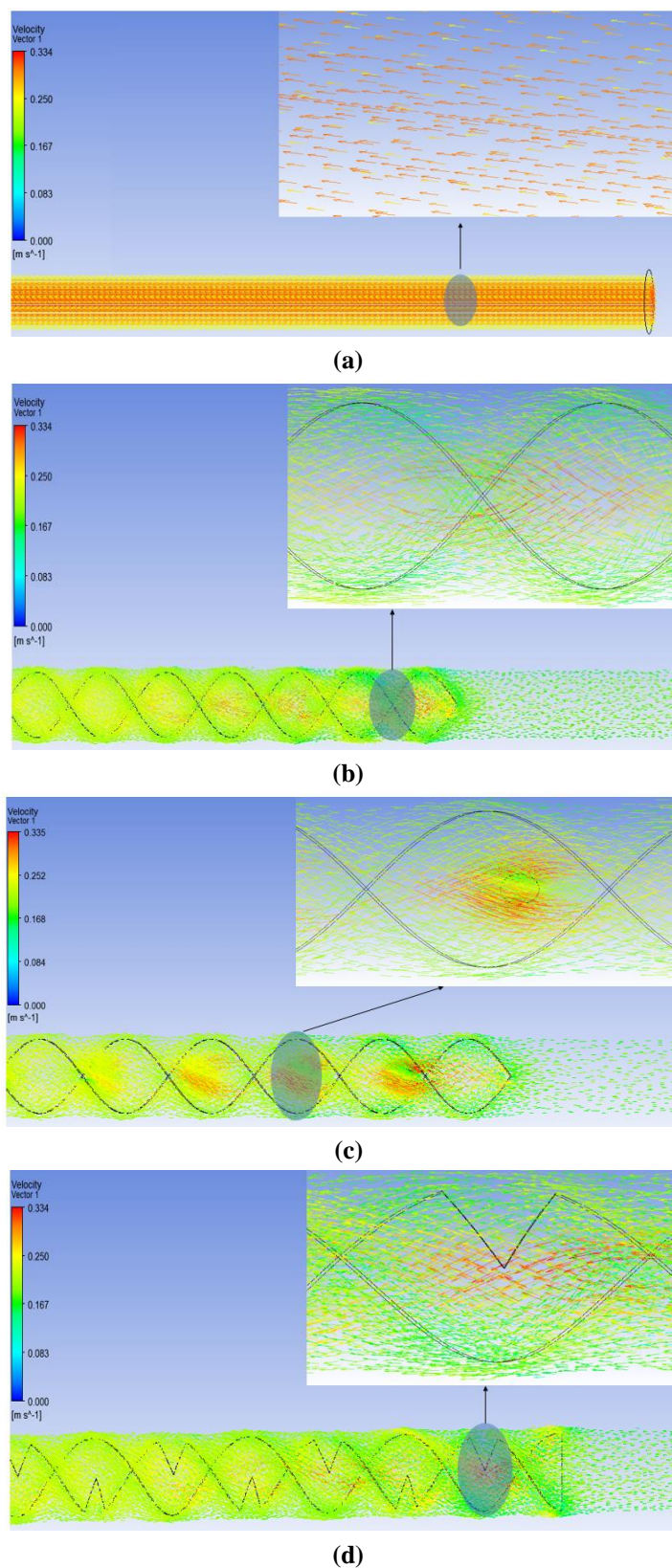
$$f = 0.3164 / Re^{0.25} \quad (12)$$

نتایج ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز، برای عدد رینولدزهای ۳۰۰۰ تا ۱۹۰۰۰ در لوله ساده و نتایج به‌دست آمده از رابطه بلاسیوس در شکل (۹) نشان داده شده است. باتوجه به شکل، اختلاف ضریب اصطکاک داخل لوله ساده در مقابل رابطه بلاسیوس مقدار کم و قابل قبول است (به‌خصوص در اعداد رینولدز بالا). نمودارهای بردار جریان سیال در لوله ساده و لوله مجهز به همزن نواریپیچیده کلاسیک، حفره‌دار و V-Cut در شکل (۱۰) مقایسه شده‌اند. پیداست که در لوله بدون همزن، جریان، مستقیم و بدون تلاطم است و در لوله مجهز به همزن نواریپیچیده کلاسیک، جریان چرخشی و مارپیچی ایجاد می‌شود. این پدیده منجر به آمیختگی بهتر مایع بین دیواره‌های لوله و مناطق مرکزی می‌شود. همچنین در قسمت‌های حفره‌دار الگوی جریان بین جریان‌های چرخشی و شعاعی است؛ به این شکل که در نزدیکی دیواره همانند همزن کلاسیک جریان چرخشی و در اطراف حفره و نزدیک مرکز لوله، جریان‌های محوری و شعاعی حاکم است؛ لذا این پدیده به اختلاط بهتر مایع در این همزن‌ها نسبت به همزن‌های کلاسیک منجر می‌شود.



شکل ۹. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و رابطه بلاسیوس.

Figure 9. Comparison of modeling results and Blasius equation.



شکل ۱۰. مقایسه بردارهای جریان در داخل لوله: (a) لوله بدون همزن استاتیک (b) همزن استاتیک کلاسیک (c) همزن استاتیک حفره‌دار (d) همزن استاتیک V-Cut.

Figure 10. Comparison of flow vectors inside the tube (a) Plain tube, (b) Classical twisted tape, (c) Perforated twisted tape, (d) V-Cut twisted tape.

در همزن V-Cut نیز همانند شکل دو الگوی جریان چرخشی (یکی به دلیل وجود برش V-Cut و دیگری به دلیل مارپیچ بودن همزن) رخ می‌دهد که باعث تلاطم بیشتر در نقاط برش‌دار و این امر به اختلاط بیشتر منجر می‌شود. شکل (۱۱) تغییرات ضریب اصطکاک به دست آمده نسبت به تغییرات عدد رینولدز را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزایش عدد رینولدز به طور کلی موجب کاهش ضریب اصطکاک خواهد شد و در همزن نواریپیچیده کلاسیک در تمامی حالات ضریب اصطکاک بیشتر از حالت بدون همزن است. با افزایش نسبت قطر و کاهش نسبت پیچش، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد؛ دلیل این موضوع افزایش جریان‌های چرخشی به دلیل بزرگ‌تر شدن قطر همزن و افزایش عناصر اختلاط است.

در همزن نواریپیچیده حفره‌دار ضریب اصطکاک در تمامی حالات کمتر از حالت کلاسیک است؛ دلیل آن کاهش جریان‌های چرخشی به دلیل ایجاد جریان‌های شعاعی و محوری است، که این موضوع هم‌زمان با کاهش افت فشار و ضریب اصطکاک به تلاطم بیشتر مایع و در پایان به اختلاط هرچه بهتر آن کمک کرده است. با افزایش نسبت فاصله، ضریب اصطکاک افزایش یافته است و بیشترین ضریب اصطکاک مربوط به همزن با نسبت فاصله ۲ است که دلیل آن کاهش تعداد حفره‌ها در داخل همزن است. در همزن‌های V-Cut به دلیل ایجاد دو جریان چرخشی یکی به دلیل وجود برش‌ها و دیگری به دلیل مارپیچ بودن همزن، افت فشار و ضریب اصطکاک به مراتب بیشتر از همزن کلاسیک است. مشخص شد که هرچه نسبت عمق برش بیشتر باشد جریان چرخشی قوی‌تر و تلاطم آن بیشتر است.

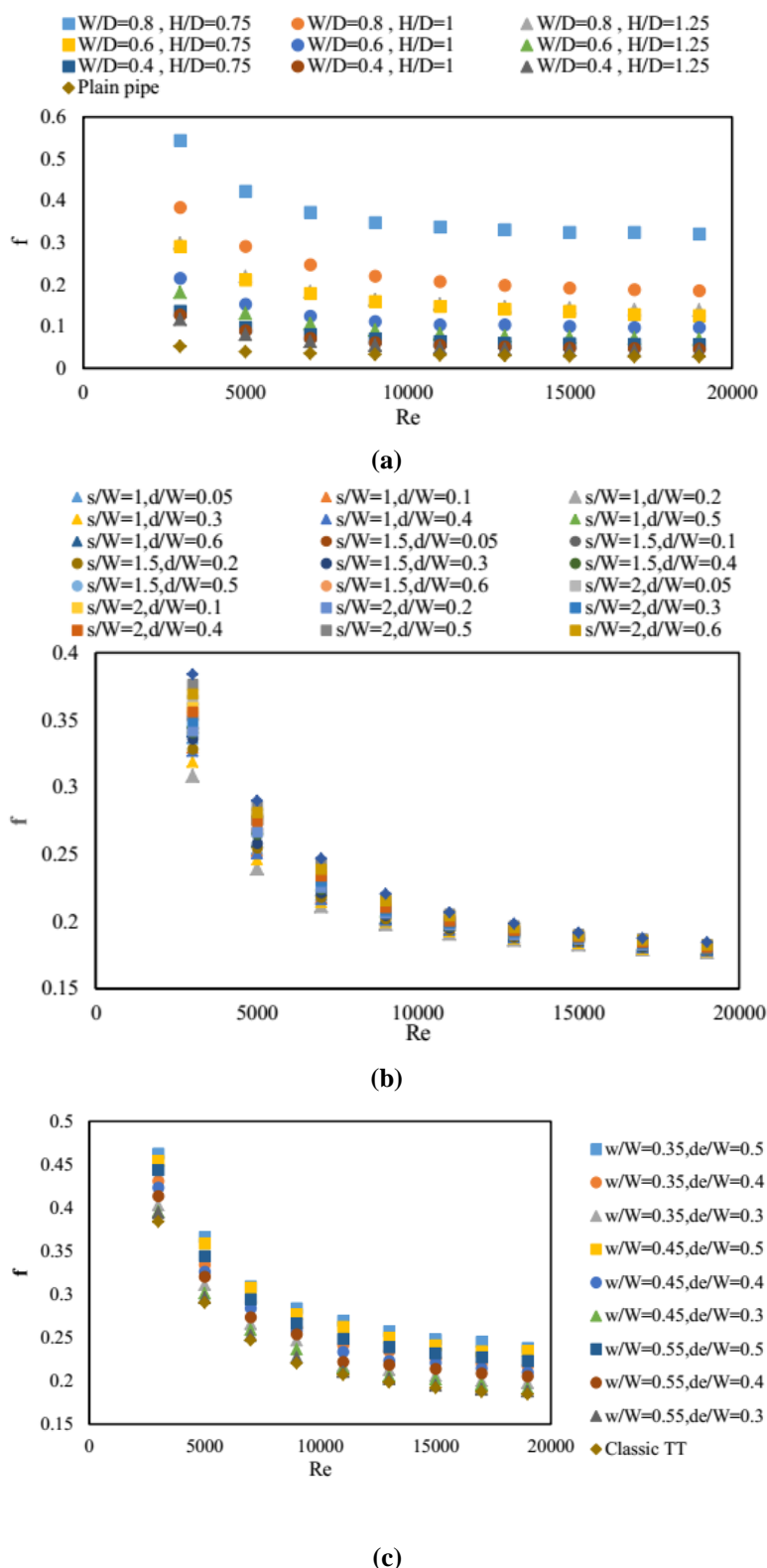
به همین دلیل ضریب اصطکاک آن نیز بیشتر و اختلاط نسبت به همزن کلاسیک بیشتر است. همچنین افزایش نسبت پهنای برش به دلیل بزرگ‌تر شدن مجرای عبوری جریان و کاهش سرعت در قسمت بالایی برش، سبب کاهش ضریب اصطکاک و افت فشار می‌شود.

#### ۴-۲ نتایج شبکه عصبی مصنوعی

در این مطالعه نتایج شبیه‌سازی به دست آمده مربوط به ضریب اصطکاک در انواع مختلف همزن‌های استاتیک نواریپیچیده با ابعاد هندسی متفاوت، برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. شبکه عصبی مصنوعی به کار گرفته شده برای تخمین ضریب اصطکاک در همزن نواریپیچیده کلاسیک شامل سه مؤلفه ورودی و

عبارت است از: عدد رینولدز، نسبت قطر و نسبت طول پیچش. برای مدل‌سازی همزن حفره‌دار متغیرهای ورودی چنین است: عدد رینولدز، نسبت قطر و نسبت فاصله و برای همزن V-Cut متغیرهای ورودی عبارت است از: عدد رینولدز، نسبت پهنای برش و نسبت عمق برش. پیش از آموزش مدل برای افزایش سرعت مدل‌سازی داده‌ها بین ۰ تا ۱ نرمالیزه شدند. از مجموع داده‌های شبیه‌سازی شده، ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش شبکه عصبی و از باقی آن‌ها برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. با به کارگیری روش سعی و خطا به ترتیب تعداد ۷، ۶ و ۶ نرون برای مدل شبکه عصبی مربوط به همزن نواریپیچیده کلاسیک، حفره‌دار و V-Cut تعیین شد. مؤلفه‌های (وزن و بایاس) مربوط به شبکه عصبی مصنوعی آموزش داده شده در جدول‌های (۱) تا (۳) ارائه شده‌اند. با به کارگیری این مؤلفه‌ها در معادله (۳) می‌توان ضریب اصطکاک را در سامانه‌های مورد بررسی پیش‌بینی کرد.

جدول (۴) تعداد داده‌های به کار رفته برای آموزش و ارزیابی مدل در همزن‌های استاتیک را گزارش می‌دهد. تعداد داده‌های استفاده شده برای آموزش و ارزیابی مدل در همزن کلاسیک به ترتیب ۵۷ و ۲۴ داده هستند که به صورت تصادفی از بین کل داده‌های موجود انتخاب شدند. مقادیر متوسط خطای نسبی و متوسط مربع خطا (MSE و MRE) برای تمامی داده‌های نواریپیچیده کلاسیک در جدول نشان داده شده است و مقادیر پایین خطا برای داده‌های ارزیابی یعنی ۰/۱۰۹۹٪ و  $5/34 \times 10^{-6}$  برای MSE و MRE که در آموزش مدل نقش نداشتند، تأییدکننده اعتبار مدل است. همچنین تعداد داده‌های استفاده شده برای آموزش و ارزیابی مدل در همزن حفره‌دار به ترتیب ۱۳۳ و ۵۶ داده در نظر گرفته و به طور تصادفی از بین کل داده‌ها انتخاب شد. مقادیر خطا برای تمامی داده‌های همزن نواریپیچیده حفره‌دار در جدول نشان داده شده است و مقدار پایین خطا برای داده‌های ارزیابی یعنی ۰/۰۶۲٪ و  $7/21 \times 10^{-6}$  برای MSE و MRE که در آموزش مدل نقش نداشتند، تأییدکننده اعتبار مدل است. در مورد همزن V-Cut از ۵۷ و ۲۴ داده به ترتیب برای آموزش و ارزیابی مدل استفاده شد. مقادیر خطا برای داده‌های آموزش، ارزیابی و خطای کلی در جدول نشان داده شده است. مقدار پایین خطا برای داده‌های ارزیابی یعنی ۰/۰۹۲۱٪ و  $9/32 \times 10^{-6}$  برای MSE و MRE تأییدکننده اعتبار مدل است. مشاهده می‌شود که مدل علاوه بر داده‌های آموزشی، در تخمین داده‌های ارزیابی (۳۰ درصد داده‌ها) نیز دقت بالایی دارد.



شکل ۱۱. مقایسه ضریب‌های اصطکاک برحسب اعداد رینولدز در همزن‌های استاتیکی: (a) همزن استاتیکی نواری پیچیده کلاسیک (b) همزن استاتیکی نواری پیچیده حفره‌دار (c) همزن استاتیکی نواری پیچیده V-Cut.

Figure 11. Friction factor versus Reynolds numbers in static mixers (a) Classical twisted tapes, (b) Perforated twisted tapes, (c) V-Cut twisted tapes.

جدول ۱. وزن‌ها و بیاس‌ها برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک در همزن نواری پیچیده کلاسیک.

Tabel 1. The weights and biases for prediction of friction factor in the classical twisted tape..

Neuron	$W_{ji}$	$w/D$	$H/D$	$b_j$	$b_k=6.3366$
	Re				$W_{kj}$
1	0.4777	-11.1918	7.6394	8.1807	-0.3654
2	5.4787	-0.8291	3.3943	-5.2960	-0.0234
3	6.3372	-0.9298	0.3997	3.5919	-6.5584
4	2.5582	18.3314	-8.2748	-7.3389	0.115163
5	3.5413	-11.8934	-2.9430	4.3236	-0.0686
6	8.58	10.45	2.23	3.1786	0.6790
7	-1.2239	7.0599	-9.6880	5.0286	0.0165

جدول ۲. وزن‌ها و بیاس‌ها برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک در همزن نواری پیچیده حفره‌دار.

Tabel 2. The weights and biases for prediction of friction factor in the perforated twisted tape.

Neuron	$W_{ji}$	$s/w$	$d/w$	$b_j$	$b_k=2.9605$
	Re				$W_{kj}$
1	3.4058	0.2830	-12.7370	12.6849	1.1502
2	-0.1038	-11.2262	-2.9525	3.5909	-0.0295
3	-0.1473	0.1093	-16.4832	2.0735	0.0402
4	5.6340	1.5674	-1.4690	-4.6127	-0.10813
5	3.9665	0.2206	-7.5312	7.3963	-1.4119
6	2.80	-10.95	-2.69	8.2076	-0.0341
7	7.7357	-0.2333	0.2480	1.0315	-2.5825

جدول ۳. وزن‌ها و بیاس‌ها برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک در همزن نواری پیچیده V-Cut.

Tabel 3. The weights and biases for prediction of friction factor in the V-Cut twisted tape.

Neuron	$W_{ji}$	$d_c/W$	$w/W$	$b_j$	$b_k=0.7918$
	Re				$W_{kj}$
1	4.5514	-7.5972	3.0895	-8.6540	-0.0274
2	-0.4320	6.4814	-2.6838	3.1290	-0.0280
3	13.6043	0.2568	0.0418	-4.9882	-0.1524
4	-0.8201	0.8928	-0.1996	-0.3774	0.782451
5	-2.2747	5.9747	7.5137	-7.1747	0.0148
6	15.23	-0.25	0.01	-0.4157	-0.7605

جدول ۴. خطای حاصل از مدل‌سازی شبکه عصبی برای داده‌های آموزشی و ارزیابی.

Table 4. Neural network error for training and evaluation data.

Type	Data set	Number of data	MRE (%)	MSE	SSE	R <sup>2</sup>
Classic	Training	57	0.604	$6.44 \times 10^{-7}$	$3.67 \times 10^{-5}$	0.99998
	Testing	24	1.099	$5.34 \times 10^{-6}$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.99986
	Overall	81	0.751	$2.04 \times 10^{-7}$	$1.65 \times 10^{-4}$	0.99994
Perforated	Training	133	0.474	$2.82 \times 10^{-7}$	$3.75 \times 10^{-4}$	0.99994
	Testing	56	0.625	$7.21 \times 10^{-7}$	$4.04 \times 10^{-4}$	0.99968
	Overall	189	0.519	$4.12 \times 10^{-7}$	$7.78 \times 10^{-4}$	0.99992
V-cut	Training	57	0.423	$2.24 \times 10^{-7}$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.99997
	Testing	24	0.921	$9.32 \times 10^{-7}$	$2.24 \times 10^{-4}$	0.99985
	Overall	81	0.570	$4.34 \times 10^{-7}$	$3.51 \times 10^{-4}$	0.99994

چرخشی و شعاعی باوجود ضریب اصطکاک کمتر نسبت به حالت کلاسیک باعث اختلاط بیشتر و تبدیل به کارآمدترین همزن شد. از نتایج شبیه‌سازی CFD برای آموزش سه مدل شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. دل‌های شبکه عصبی آموزش داده‌شده برای سامانه‌های مورد مطالعه دقت بالایی در تخمین ضریب اصطکاک داشتند. در میان سه همزن بررسی شده کمترین خطای ارزیابی (داده‌هایی که در آموزش نقش نداشتند) با مقدار ۰/۶۲ درصد مربوط به همزن نواریچیده حفره‌دار بود و دو همزن کلاسیک و V-Cut به‌ترتیب دارای خطاهای نسبی ۱/۱ و ۰/۹۲ درصدی بودند. نتایج مدل‌سازی شبکه عصبی بیانگر است که مدل ایجادشده برای همزن حفره‌دار توانایی بیشتری برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک نسبت به دو همزن دیگر داشته است. با توجه به نیاز روش مدل‌سازی شبکه عصبی به تعداد زیاد داده‌های ورودی، به‌کارگیری شبیه‌سازی CFD موجب کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و امکان بررسی مؤلفه‌های بیشتر می‌شود.

موروثسان و همکاران [۲۰] روابطی را برای پیش‌بینی داده‌های تجربی همزن‌های استاتیک V-Cut ارائه شده مانگلیک و برگلس [۲۱] گزارش کردند. نتایج مقایسه داده‌های پیش‌بینی شده و هدف بیانگر خطایی بالای ۲۰ درصد بود. درحالی‌که خطای مدل ارائه شده در این مطالعه کمتر از یک درصد به دست آمد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش افت فشار و جریان سیال بر روی همزن‌های استاتیکی به‌وسیله شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، ارزیابی و با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی ضریب اصطکاک پیش‌بینی شد. مشاهده شد که در تمامی همزن‌ها به‌علت تغییر حالت جریان از مستقیم به چرخشی افت فشار و ضریب اصطکاک بیشتر از حالت بدون همزن بود. در میان سه همزن بررسی شده افت فشار و ضریب اصطکاک همزن V-Cut بیشتر از حالت کلاسیک و همزن حفره‌دار کمتر از حالت کلاسیک بود. همزن حفره‌دار به‌علت ایجاد جریان‌های

- [7] Regner, M., Östergren, K., Trägårdh, C., "Effects of geometry and flow rate on secondary flow and the mixing process in static mixers—a numerical study", Chemical engineering science, 61, pp. 6133-6141, (2006).
- [8] Singh, M. K., Anderson, P. D., Meijer, H. E., "Understanding and optimizing the SMX static mixer", Macromolecular rapid communications, 30: pp. 362-376, (2009).
- [9] Soman, S. S., Madhuranthakam, C. M. R., "Effects of internal geometry modifications on the dispersive and distributive mixing in static mixers", Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 122, pp. 31-43, (2017).
- [10] Meng, H. B., Song, M. Y., Yu, Y. F., Jiang, X. H., Wang, Z. Y., Wu, J. H., "Enhancement of laminar flow and mixing performance in a Lightnin static mixer", International Journal of Chemical Reactor Engineering, 15, p. 20160112, (2016).
- [11] Meng, H., Wang, F., Yu, Y., Song, M., Wu, J., "A numerical study of mixing performance of high-viscosity fluid in novel static mixers with multitwisted leaves", Industrial & Engineering Chemistry Research, 53, pp. 4084-4095, (2014).
- [12] Singh, M. K., Anderson, P. D., Meijer, H. E., "Understanding and optimizing the SMX static mixer", Macromolecular rapid communications, 30, pp. 362-376, (2009).
- [13] Dagdevir, T., Ozceyhan, V., "An experimental study on heat transfer enhancement and flow characteristics of a tube with plain, perforated and dimpled twisted tape inserts", International Journal of Thermal Sciences, 159, p. 106564, (2021).
- [14] Kumar, R., Nandan, G., Dwivedi, G., Shukla, A. K., Shrivastava, R., "Modeling of triangular perforated twisted tape with V-Cuts in double pipe heat exchanger", Materials Today: Vol. 46, p. 5389-5395, (2021).
- [15] Cybenko, G. V., "Mathematics of control", Signals and Systems, 2, pp. 303-314, (1989).
- [16] Beigzadeh, R., Rahimi, M., Jafari, O., Alsairafi, A. A., "Computational fluid dynamics assists the artificial neural network and genetic algorithm approaches for thermal and flow modeling of air-forced convection on interrupted plate fins", Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 70, pp. 546-565, (2016).
- [17] Levenberg, K., "A method for the solution of certain non-linear problems in least squares", Quarterly of applied mathematics, 2, pp. 164-168, (1944).
- [18] Marquardt, D. W., "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters", Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics, 11, pp. 431-441, (1963).

## ۶. علائم و نشانه‌ها

b	بیاس
D	قطر لوله (m)
d	قطر حفره (m)
d <sub>e</sub>	عمق برش (m)
F	تابع انتقال
f	ضریب اصطکاک
g	شتاب گرانش (m/s <sup>2</sup> )
H	طول یک عنصر اختلاط (m)
L	طول لوله (m)
s	فاصله مرکز یک حفره تا مرکز حفره دیگر (m)
t	داده هدف
W	قطر همزن (m)
w	پهنای برش (m)
V	سرعت (m/s)
X	ورودی شبکه
Y	پاسخ نهایی شبکه
y	داده پیش‌بینی شده
ρ	جرم حجمی (kg/m <sup>3</sup> )
μ	گرانروی (kg/m.s)

## مراجع

- [1] Bor, T., "Static Mixer as a Chemical Reactor", British Chemical Engineering, 16, pp. 610-612, (1971).
- [2] Myers, K. J., Bakker, A., Ryan, D., "Avoid agitation by selecting static mixers", Chemical engineering progress, 93, pp. 28-38, (1997).
- [3] Shojaei, S., Hosseini, S. H., Rafati, A., Ahmadi, G., "Prediction of the effective area in structured packings by computational fluid dynamics", Industrial & engineering chemistry research, 50, pp. 10833-10842, (2011).
- [4] Fourcade, E., Wadley, R., Hoefsloot, H. C., Green, A., Iedema, P. D., "CFD calculation of laminar striation thinning in static mixer reactors", Chemical Engineering Science, 56, pp. 6729-6741, (2001).
- [5] Liu, S., Hrymak, A. N., Wood, P. E., "Laminar mixing of shear thinning fluids in a SMX static mixer", Chemical Engineering Science, 61, pp. 1753-1759, (2006).
- [6] Baumann, A., Jeelani, S. A. K., Holenstein, B., Stössel, P., Windhab, E. J., "Flow regimes and drop break-up in SMX and packed bed static mixers", Chemical Engineering Science, 73, pp. 354-365, (2012).

- [19] Hagan, M. T., Menhaj, M. B., "Training feedforward networks with the Marquardt algorithm", IEEE transactions on Neural Networks, 5, pp. 989-993, (1994).
- [20] Murugesan, P., Mayilsamy, K., Suresh, S., Srinivasan, P. S. S., "Heat transfer and pressure drop characteristics in a circular tube fitted with and without V-cut twisted tape insert", International Communications in Heat and Mass Transfer, 38, pp. 329-334, (2011).
- [21] Manglik, R. M., Bergles, A. E., "Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes: Part II—Transition and turbulent flows", Journal of Heat Transfer, 115, pp. 890-896, (1993).