

# ارائه رابطه نیمه تجربی نوین به منظور طراحی جداسازهای دو فازی

مهدي فدائي، محمدجواد عامري<sup>\*</sup>، يوسف رفيعي، محمدرضا حسينزاده، علي سلمانی سیاح و کیوان قربان پور  
دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵

## چکیده

جداسازها در میدان‌های تولیدی نفت و گاز دارای نقش بسیار مهم و کلیدی هستند. به همین دلیل، طراحی بهینه آنها بسیار با اهمیت است. روش طراحی با معادلات نیمه تجربی روشی مرسوم برای تعیین ابعاد جداسازها است. با این حال، به دلیل فرضیات ساده کننده‌ای که در آنها استفاده می‌شود، فقط می‌تواند برای بدست آوردن تقریبی از ابعاد جداسازها استفاده شود. در این مطالعه، با استفاده از واحد پایلوت جداساز دو فازی گاز-مایع صحت و دقت روابط نیمه تجربی بررسی گردید و از نتایج آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی CFD به عنوان داده‌های لازم برای طراحی و ساخت شبکه عصبی بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک استفاده شدند و یک مدل برای تعیین ضریب تصحیح روابط نیمه تجربی در شرایط عملکردی متفاوت ارائه گردید. واحد پایلوت آزمایش جداساز متشکل از یک جداساز افقی دو فازی در مقیاس آزمایشگاهی، پمپ‌ها، کمپرسورها و یک مخلوط کننده استاتیک برای تشکیل جریان دو فازی و یک فیلتر مایع برای به دام انداختن قطرات مایع از جریان گاز خروجی از جداساز است. با استفاده از وزن کردن قطره‌های مایع گیر انداخته شده بازده جداسازی و با استفاده از تصویربرداری حداکثر قطر قطرات مایع در جریان گاز خروجی تعیین می‌شود. مدل CFD توسعه داده شده با داده‌های آزمایشگاهی دارای خطای نسبی کمتر از ۸٪ بود و مقدار خطای جذر میانگین مربعات شبکه عصبی بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک برای مقادیر واقعی و پیش بینی شده ضرایب تصحیح برابر با ۱٪ است. یکی از مهمترین دستاوردهای این پژوهش فراهم آوردن بستر لازم برای طراحی بهینه جداسازهای سطحی است.

**کلمات کلیدی:** رابطه، نوین، طراحی، جداساز، جریان، دو فازی

## مقدمه

سیال تولیدی با استفاده از اختلاف چگالی بین دو فاز است. بررسی و تعیین شرایط بهینه عملیاتی و همچنین، دستیابی به طراحی بهینه جداسازهای چندفازی علاوه بر افزایش بازدهی جداساز، بر روی کاهش هزینه‌های اقتصادی و دستیابی به درآمد

جداسازهای سر چاهی اولین وسیله عملیاتی در واحدهای بهره‌برداری هستند. وظیفه اصلی جداسازها، جدایش گرانشی گاز و مایع تشکیل دهنده

\*مسئول مکاتبات  
آدرس الکترونیکی: ameri@aut.ac.ir  
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2021.4389.2992)

ویلیکینسون و والدیاز دو نمونه آزمایشگاهی برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از روش دینامیک محاسباتی سیال استفاده کردند [۲]. آن‌ها در مرحله اول به کمک روش دینامیک محاسباتی سیال مشخصات پروفایل جریان درون جداساز را به دست آوردند و در مرحله دوم به کمک روش‌های آزمایشگاهی، درستی این اطلاعات را صحت‌سنجی کردند.

ویلیکینسون و همکارانش یکی از کامل‌ترین فرآیندهای طراحی جداساز را به کمک روش دینامیک محاسباتی سیال و روش‌های آزمایشگاهی انجام دادند [۳]. روند کاری آن‌ها از ساخت مدل آزمایشگاهی و سیالاتی یک جداساز کوچک مقیاس آغاز و به بررسی کارایی و شیوه طراحی جداسازهای سه فازی بزرگ مقیاس به روش دینامیک محاسباتی سیال ختم شد. نتایج کار این گروه به خوبی نشان داد که بهترین جدایش بین فازها زمانی اتفاق می‌افتد که پدیده حمل مجدد مایع توسط فاز گاز صورت نگیرد و در کنار آن جریان در قسمت جدایش گرانشی به صورت کاملاً یکنواخت و دور از تلاطم باشد. کلیه مدل‌های موجود درون این کار توسط نرم‌افزار PHOENICS ۱/۵ تحلیل گردیده است. از مدل بسیار شناخته شده کا-اِپسیلون برای مدل کردن اثر اغتشاش استفاده گردیده است اما سایر مشخصات روند تحلیل در این کار ارائه نشده است.

از جمله نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط ویلیکینسون و همکاران، مدل‌سازی دقیق جداساز آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار فلونت است زیرا نرم‌افزار PHOENICS ۱/۵ اثرات مربوط به اغتشاش جریان چند فازی را در نظر نمی‌گیرد و از مدل‌های بسیار ساده چند فازی مثل مدل ترکیب استفاده می‌کند در حالی که مدل‌های چندفازی جدیدتر از جمله حجم سیال توانایی مدل کردن تمامی پارامترهای جریان چند فازی چون اغتشاش، گردابه‌ها، قطرات مایع و اثرات اغتشاش در نزدیک دیواره و جداشوندگی و به هم

بیشتر حاصل از تولید محصولات با ارزش تأثیر بسزایی خواهد داشت. معمولاً روش‌های نیمه‌تجربی طراحی جداساز به منظور تعیین طول و قطر بهینه جداسازها به کار برده می‌شوند. اما این روش‌ها بر پایه فرضیات ساده کننده‌ای به دست آمده‌اند که اعتماد به طراحی با استفاده از آن‌ها را دشوار می‌کند. بنابراین برای دستیابی به طراحی فرآیندی جداساز، وجود یک واحد پایلوت آزمایشگاهی به منظور بررسی بازدهی جداساز در شرایط مختلف عملیاتی ضروری است.

در این پژوهش، ابتدا آزمایش‌های تجربی روی واحد پایلوت ساخته شده انجام می‌شود و اثر عواملی مانند ارتفاع سطح مایع و شرایط عملیاتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس یک مدل CFD بر پایه واحد پایلوت طراحی و با خطای نسبی کمتر از ۰/۸٪ با داده‌های تجربی اعتبارسنجی می‌شود. یک روش نیمه تجربی برای شرایط مشابه واحد پایلوت به کار گرفته شده و مقایسه نتایج حاصل از آن با داده‌های تجربی متناظر، دقت پایین روش نیمه‌تجربی را نشان می‌دهد. در مرحله آخر، از داده‌های تجربی موجود و داده‌های تولید شده از مدل CFD اعتبارسنجی شده به منظور طراحی یک شبکه عصبی و پیش‌بینی یک ضریب تصحیح برای روش نیمه تجربی مورد بررسی استفاده می‌شود. آنالیز حساسیت سنجی نشان می‌دهد که از بین ۱۰ پارامتر مؤثر بر ضریب تصحیح، ۴ مورد تأثیر بسیار بیشتری از بقیه دارند. فول و کین مطالعاتی را بر روی جداساز شامل مه‌گیر پره‌ای انجام دادند [۱]. هدف اصلی این پژوهش تعیین ظرفیت کاری جداساز و هریک از اجزای داخلی آن است. در روش‌های آزمایشگاهی برای تعیین کارایی هریک از اجزا و جداساز مورد بررسی، ابتدا مدل کوچکی از جداساز ساخته می‌شود و در مرحله بعد به کمک آنالیز ابعادی و افزایش مقیاس، ظرفیت کاری جداساز در ابعاد واقعی تخمین زده می‌شود.

پیوستن قطرات را دارا است [۳].

لی و همکارانش برای حل مشکلات عملیاتی موجود در جداسازها چندین پیشنهاد عملیاتی را ارائه دادند و مؤثر بودن این پیشنهادها را از طریق روش دینامیک محاسباتی سیال ارزیابی کردند [۴]. یکی از نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط لی و همکاران، اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال با نتایج تجربی است که از این طریق بهترین مدل شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال برای جداسازی چند فاز تعیین می‌شود [۴].

هانسن و همکاران یک برنامه شبیه‌سازی سیالاتی به نام FLOSS را برای شبیه‌سازی جریان درون جداساز پیشنهاد دادند [۵]. آن‌ها همچنین نتایج شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال حاصل از این نرم‌افزار را با روش‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی کردند. از جمله نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط هانسن، در نظر گرفتن جداسازی قطرات علاوه بر هم آمیختگی بود زیرا در جداسازهای چندفازی به دلیل حرکت قطرات مایع جدایش قطرات نیز رخ می‌دهد که حتماً باید در نظر گرفته شود [۵].

پورا احمدی لاله و همکاران به بررسی جریان درون جداساز سرچاهی به روش دینامیک محاسباتی سیال پرداختند [۶]. ابعاد این جداساز همان ابعاد به کار برده شده در مقاله هانسن و همکارانش است [۵]. هدف از انجام این بررسی تعیین کارایی این جداساز پس از افزایش دبی ورودی آب به درون جداساز در نظر گرفته شده است. براساس این مطالعه کارایی جداساز برای فاز نفت بعد از افزایش میزان آب به شدت کاهش می‌یابد اما این تغییرات تأثیر چندانی بر کارایی جداساز در خروجی گاز ندارد.

غفارخواه و همکارانش با استفاده از دو روش تعیین ابعاد نیمه تجربی آرنولد- استوارت و مونری-سروک

ابعاد جداساز چند فاز را تعیین نمودند [۷]. سپس از ترکیب دو مدل حجم سیال و مدل فاز گسسته به همراه مدل اغتشاش کا-اوسیلون برای بررسی رفتار سیالات چندفازی و میزان جداسازی در جداساز چندفازی استفاده کردند. همچنین، نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده بازده بالاتر جداساز آرنولد- استوارت در قسمت آب و نفت دارد. از نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط غفارخواه و همکاران، همان‌طور که غفارخواه و همکاران پیشنهاد نموده‌اند مقایسه نتایج شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال با نتایج تجربی است تا بهترین مدل شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال برای جداسازی چند فاز تعیین شود [۷].

آچاریا و کاسیمپرو از شبیه‌سازی‌های دینامیک محاسباتی سیال به منظور تعیین دو پارامتر زمان ماند متوسط و توزیع زمان ماند به صورت توابعی از کسر حجمی آب در دبی ورودی استفاده کرده و نتایج را با نتایج تجربی محققان پیشین که یک هندسه مشابه را به کار گرفته بودند، مقایسه کردند [۸]. از نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط آچاریا و کاسیمپرو سه بعدی بودن شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال و تعیین قطر قطرات مایع در جریان گاز خروجی از جداساز است [۸].

احمد و همکاران دو جداساز پایلوت موجود با دو کیفیت پایین و بالای حجمی گاز را با استفاده از دینامیک محاسباتی سیال شبیه‌سازی کردند [۹]. دو مدل جریان چندفازی اولری و حجم سیال به منظور شبیه‌سازی الگوی جریان و رفتار فاز سیال درون هر جداساز مورد استفاده قرار گرفتند. بازده جداسازی در این شبیه‌سازی‌ها با هر کدام از دو مدل مختلف در مقایسه با داده‌های تجربی تا ۳۰٪ خطا دارد. از جمله نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط احمد و همکارانش استفاده

ساده شونده‌ای حین به دست آوردن این روابط نیمه تجربی استفاده شده‌اند که ممکن است نتایج آن‌ها را از واقعیت دور کرده باشد که عبارتند از:

۱- تأثیر اجزای داخلی جداساز بر فرآیند جدایش نادیده گرفته شده است.

۲- قطر ذرات فاز گسسته یک مقدار ثابت و از پیش تعیین شده است.

۳- در حل مسأله با این روش فرض شده است که تمامی قطرات در ابتدا در بالاترین نقطه جداساز قرار داشته و سقوط خود را از آن نقطه شروع می‌کنند، در حالی که در واقعیت، وجود منحرف کننده ورودی باعث کاهش سریع تکانه ذرات مایع شده و تنها درصد کمی از قطرات مایع جدایش گرانشی خود را از بالاترین نقطه جداساز آغاز می‌کنند.

۴- مفاهیم مربوط به جریان مغشوش در این روش در نظر گرفته نشده است.

۵- این روش قادر به تشخیص مشکلات فرآیند جداسازی نبوده و در نتیجه نمی‌تواند به تنهایی برای عیب‌یابی جداساز مورد استفاده قرار بگیرد.

۶- در این روش طراحی، بخش خارج از طول مؤثر در فرآیند طراحی جداساز و تعیین ابعاد بهینه در نظر گرفته نمی‌شود؛ در صورتی که این منطقه در برخی از موارد می‌تواند بر روی فرآیند جدایش تأثیر بگذارد.

معادلات آرنولد- استوارت برای جداساز افقی در حالت‌هایی که ارتفاع مایع در جداساز به اندازه ۵۰، ۱۰ و ۹۰٪ ارتفاع کل جداساز باشد در حالت استاندارد به ترتیب به صورت زیر خواهد بود [۱۲].

$$D \times L_{eff} = 34.5 \times \left( \frac{TZQ_{std.g}}{P} \right) \left[ \left( \frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{0.5} \quad (1)$$

$$D \times L_{eff} = 6.9 \times \left( \frac{TZQ_{std.g}}{P} \right) \left[ \left( \frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{0.5} \quad (2)$$

$$D \times L_{eff} = 6.9 \times \left( \frac{TZQ_{std.g}}{P} \right) \left[ \left( \frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{0.5} \quad (3)$$

معادلات بالا برای شرایط استاندارد به دست آمده‌اند. طراحی جداساز برای ارتفاع‌های مختلف

از مدل شبیه‌سازی حجم سیال با مدل اغتشاش کا-پسیلون است که باعث کاهش خطا بین نتایج شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال با داده‌های تجربی به کمتر از ۹٪ می‌شود [۹].

فرانک و همکارانش تلاش کردند تا با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال جنبه‌های مهم برای بهینه‌سازی عملکرد جداساز دو فازی را شناسایی کنند. این پژوهش نیز فاقد اعتبارسنجی با داده‌های تجربی بود و نتایج شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال با نتایج حاصله از نرم‌افزار OLGA مقایسه شدند [۱۰].

غفارخواه و همکاران به منظور تعیین ابعاد بهینه جداسازهای سه‌فازی، یک جداساز نصب شده در یکی از میداین میعان گازی ایران را با شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال و بر اساس خواص سیال آن میدان شبیه‌سازی کردند [۱۱]. آن‌ها نشان دادند که عملکرد جداساز با ضریب لاغری رابطه عکس دارد. از نقاط ضعف پژوهش انجام شده توسط غفارخواه و همکارانش نبود داده‌های تجربی به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال با آن‌ها بود [۱۱]. نوآوری‌های کار حاضر به شرح زیر است:

- طراحی و ساخت پایلوت جداساز دو فازی آزمایشگاهی

- به‌دست آوردن بهترین مدل برای شبیه‌سازی CFD جداسازهای دو فازی در صنایع نفت و گاز

- تعیین ضریب تصحیح روابط نیمه تجربی طراحی جداسازهای دو فازی گاز-مایع با استفاده از شبکه عصبی بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک

### روش نیمه تجربی آرنولد- استوارت

در این پژوهش از معادلات نیمه تجربی آرنولد- استوارت به منظور مدل‌سازی نیمه تجربی استفاده می‌شود [۱۲]. این روابط نیمه تجربی بیان‌کننده حد گاز برای جداساز دو فازی هستند. فرض‌های

نیمه‌پر باشد صادق است و در غیر این صورت یک ضریب به رابطه افزوده می‌شود.

### مدل حجم سیال

این مدل به منظور ردیابی فصل مشترک بین چند سیال امتزاج‌ناپذیر طراحی شده است. در این مدل یک سری معادلات تکانه به جریان چند فازی اختصاص داده می‌شود و درصد هر یک از فازها در هر سلول با ردیابی کسر حجمی در هر سلول تعیین می‌گردد. مدل حجم سیال برای جریان‌های لایه‌ای، جریان سطح آزاد، حرکت حباب در یک مایع یا قطره در گاز، حرکت جت سیال و رهگیری پایا یا غیرپایای هر نوع فصل مشترک گاز-مایع قابل استفاده است [۱۳]. با استفاده از رابطه ۵ کسر حجمی فاز گاز در جریان دو فازی که نسبت لغزش برابر با واحد نباشد تعیین می‌گردد [۱۴].

$$\alpha = \left[ 1 + \frac{(1-x)}{x} \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right) S \right]^{-1} \alpha \quad (5)$$

روش حل به این صورت است که معادلات پیوستگی و تکانه برای کل محدوده محاسباتی حل می‌شود، که شامل مراحل مختلف است. در حل این معادلات، خصوصیات سیال از جمله چگالی و ویسکوزیته محاسبه و با توجه به ترکیب فازهای مختلف با استفاده از قوانین مخلوط جایگزین می‌شوند و ترم کشش سطحی به معادله تکانه اضافه می‌شود. وقتی دو فاز در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، یک پیوستگی از سرعت و تنش در فازها به وجود می‌آید. این بدان معنی است که سرعت و تنش دو فاز در رابطه برابر است، اما به دلیل کشش سطحی، ترم فشار دارای جهش است [۲۳]. این جهش برای حباب به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R} \quad (6)$$

در رابطه بالا،  $\Delta P$  اختلاف فشار بین داخل و خارج حباب است. اگر قرار باشد حباب به طور مداوم و هنگام حرکت بررسی شود، گفته می‌شود که فشار

مایع و شرایط یکسان با آزمایش‌های آزمایشگاهی با در نظر گرفتن بیشینه اندازه قطره مایع به دست آمده در هر کدام از آزمایش‌ها بدین صورت انجام گرفت که تمام متغیرها در شرایط انجام همان آزمایش به همراه بیشینه اندازه قطر قطره مایع واقعی مربوط به آن آزمایش در سمت راست معادله مربوطه جایگذاری شد. قطر جداساز نیز به دلیل این که قابل تغییر نیست در سمت چپ معادله جایگذاری شده و طول مؤثر تئوری برای شرایط آن آزمایش به دست آمد.

در روش نیمه‌تجربی آرنولد-استوارت، دو قید ظرفیت گاز و ظرفیت مایع باید در این روش طراحی برآورده شوند. جداساز باید دبی مشخصی از گاز را به صورتی در خود جای دهد که قطرات مایع درون فاز پیوسته گاز فرصت سقوط به سمت فاز پیوسته مایع را پیدا کنند. جداساز همچنین باید حجمی برای مایع فراهم کند تا زمان ماند کافی تأمین شده و حباب‌های گاز نیز از مایع خارج شده و دو فاز به تعادل برسند. بنابراین، ابعاد جداساز برای هر کدام از دو ظرفیت به صورت مجزا طراحی می‌شود. ابعاد نهایی باید هر دو ظرفیت را برآورده کند.

### قید ظرفیت مایع

پارامتر اصلی در طراحی جداساز بر مبنای قید ظرفیت مایع، زمان ماند است. زمان ماند بدین معنا است که جریان مایع به طور متوسط برای چه مدت زمانی در جداساز می‌ماند. هر چه این مدت زمان بیشتر باشد، ابعاد جداساز نیز باید بزرگتر شوند. طراحی جداسازها باید به گونه‌ای انجام شود که زمان ماند مایع تأمین شود [۱۲]. رابطه زیر برای تعیین ابعاد جداسازهای نیمه‌پر با دبی حجمی مایع و زمان ماند معلوم قابل استفاده است:

$$d^2 L_{eff} = \frac{t_r Q_L}{0.7} \quad (4)$$

برای درک این رابطه باید دانست که حاصلضرب دبی حجمی مایع در زمان ماند آن برابر است با حجمی که مایع در جداساز اشغال می‌کند. این رابطه فقط برای زمانی که جداساز به حالت

هوشمندی از خود نشان می‌دهد. یک شبکه عصبی متشکل از نورون‌های فردی است که به یکدیگر متصل هستند و اتصالات اندازه‌گیریکنواختی دارند. به هر اتصال یک وزن منحصر به فرد تخصیص داده شده است. در صورتی که هیچ ارتباطی بین دو نورون وجود نداشته باشد، وزن ارتباط صفر در نظر گرفته می‌شود. این وزن‌ها خروجی شبکه عصبی را ایجاد می‌کنند. بر این اساس، می‌توان گفت که وزن‌ها حافظه شبکه‌های عصبی را تشکیل می‌دهند. هنگامی که معماری شبکه برای یک کاربرد خاص تشکیل شده است، شبکه آماده آموزش است. مانند روش‌های دیگر هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی مصنوعی نقاط قوت و محدودیت‌هایی دارند. برخی از نقاط قوت شبکه عصبی مصنوعی به شرح زیر است:

- توانایی یادگیری برای شناختن الگوها با تقریب توابع با شناسایی مقادیر وزن

- شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند یک ساختار براساس داده‌های ورودی و خروجی دریافت شده از طریق آموزش تولید کند. توابع شبکه‌های عصبی مصنوعی به صورت موازی هستند نه سریال، بنابراین واحدها و یا اتصالات معیوب منجر به افت تدریجی می‌شوند نه فروپاشی ناگهانی [۱۸، ۲۱].

- مهم‌ترین نقطه قوت شبکه عصبی مصنوعی، توانایی پیکربندی مناسب برای گسترش قابلیت پیش‌بینی خود، فراتر از مجموعه‌ای از داده‌های همسان‌سازی شده است.

شبکه عصبی قادر است پس از آموزش، آنچه را که یاد می‌گیرد تعمیم دهد. آموختنی که در نتیجه قادر است به حوادث غیرمترقبه پاسخ دهد و در نهایت معماری شبکه‌های عصبی مصنوعی اجازه می‌دهد تا پردازش گسترده موازی به طور همزمان انجام شود [۱۹، ۲۲]. داده‌های موجود و در دسترس برای استفاده در شبکه عصبی باید به طور تصادفی

به سه دسته تقسیم شود.

محیط با پرش روی سطح آن به فشار داخل حباب تبدیل می‌شود. لازم به ذکر است که این بحث تعادل در تمام جریان‌های چند فاز صاف است. در روش حجم سیال، علاوه بر معادله پیوستگی، یک سری معادلات حرکت برای دامنه محاسبات نیز به شرح زیر حل می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i + F_i \quad (7)$$

آخرین ترم در مورد نیروهای کشش سطحی به عنوان یک نیروی خارجی اعمال شده بر حجم شبیه‌سازی شده است.

$$F_i = \frac{\sigma K \delta_n}{V} \quad (8)$$

این مدل به منظور ردیابی فصل مشترک بین چند سیال امتزاج‌ناپذیر طراحی شده است. در این مدل یک سری معادلات تکانه به جریان چند فاز اختصاص داده می‌شود و درصد هر یک از فازها در هر سلول با ردیابی کسر حجمی در هر سلول تعیین می‌گردد. مدل حجم سیال برای جریان‌های لایه‌ای، جریان سطح آزاد، حرکت حباب در یک مایع یا قطره در گاز، حرکت جت سیال و رهگیری پایا یا غیرپایای هر نوع فصل مشترک گاز-مایع قابل استفاده است [۱۵-۱۷].

**تعیین توزیع قطرات مایع توسط تابع رزین-رامرلر<sup>۱</sup> در مدل فاز مجزا<sup>۲</sup>**

به منظور وارد کردن توزیع قطر قطرات مایع در مدل فاز مجزا از تابع توزیع قطر قطرات روزین-رامرلر استفاده شده است. این تابع از دو پارامتر قطر متوسط  $\bar{d}$  و پارامتر توزیع  $n$  تشکیل می‌شود [۶]. معادله مربوط به این تابع به صورت زیر است:

$$Y_d = \exp \left[ - \left( \frac{d}{\bar{d}} \right)^n \right] \quad (9)$$

در این معادله، قطر متوسط از مقدار بیشینه قطر قطره به صورت زیر قابل تخمین است:

$$\bar{d} = 0.4d_{max} \quad (10)$$

### شبکه عصبی و آموزش آن

شبکه عصبی مصنوعی از توانایی یادگیری داده‌ها در طول آموزش برخوردار است و قابلیت‌های

نرمال‌سازی می‌شوند. در صورتی که شبکه عصبی طراحی شده از عهده پیش‌بینی به خوبی برنیاید (مقدار تابع هدف از مقدار مد نظر بیشتر باشد) تعداد نوروها در لایه پنهان تا جایی که بحث بیش‌برازش پیش نیاید افزایش داده می‌شود. در صورتی که همچنان نتایج مطلوب حاصل نشود تعداد لایه‌های پنهان افزایش داده شده و به شکل مرحله قبل تعداد نوروها در هر دو لایه آنقدر افزایش داده می‌شود تا نتایج مطلوب حاصل شود. مدل آموزش دیده شده در انتها به وسیله داده‌های آزمایش ارزیابی می‌شود. نمودار متوسط درصد خطای مطلق برای آموزش و اعتبارسنجی شبکه عصبی به ازای تعداد نوروها به دست می‌آید. سپس تعداد بهینه نوروها در شبکه عصبی که شبکه عصبی حداقل متوسط درصد خطای مطلق برای آموزش و اعتبارسنجی را داشته باشد تعیین می‌شود.

#### مراحل انجام آزمایش‌های تجربی

شکل ۱ ابعاد واقعی جداساز دو فاز مایع-گاز را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ورودی جداساز یک زانویی  $90^\circ$  است و در انتهای جداساز خروجی گاز و مایع وجود دارد. برای کنترل سطح مایع از ارتفاع سنج استفاده شد. برای اندازه‌گیری فشار و دمای جداساز در طول آزمایش از گیج فشار و دما نیز استفاده شده است.

#### مدار جریان دوفازیدو فاز مایع-گاز

برای ارزیابی عملکرد جداساز دو فاز مایع-گاز، یک مدار جریانی دو فاز (مایع-گاز) طراحی و ساخته شد (شکل ۲). جریان آب توسط پمپ آب از مخزن آب به مدار جریانی پمپ می‌شود و پس از اندازه‌گیری میزان جریان آن توسط روماتر آب و تعیین دما و فشار آن، با جریان گاز حاصل از کمپرسور هوا در نقطه اختلاط توسط یک مخلوط‌کننده استاتیک تشکیل جریان دو فاز می‌دهند. سپس جریان دوفازیدو فاز پس از طی فاصله‌ای به اندازه ۱۶۰ برابر قطر خط لوله تشکیل جریان دو فاز می‌دهد.

دسته اول که نسبت به دو دسته دیگر درصد بیشتری از داده‌ها را در خود جای می‌دهد به منظور آموزش شبکه عصبی مورد استفاده می‌گیرد. دو دسته کوچکتر نیز برای آزمایش و اعتبارسنجی شبکه عصبی به کار گرفته می‌شوند. پارامتر مقدار انحراف استاندارد که در علم آمار، انحراف معیار نیز نامیده می‌شود، یکی از پارامترهای مهم محسوب می‌شود. این پارامتر مقدار پراکندگی نسبت به میانگین را نشان می‌دهد. اما در حقیقت، برای محاسبه انحراف معیار، باید در ابتدا میانگین داده‌های هر دسته خاص محاسبه شده و مقدار کمی اختلاف بین هر داده با مقدار میانگین حساب شود. مقدار انحراف معیار طبق رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (11)$$

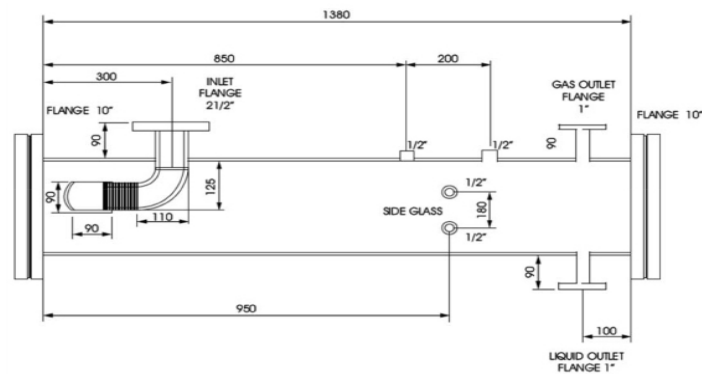
در این رابطه،  $s$  انحراف معیار،  $\bar{x}$  میانگین داده‌ها و  $n$  تعداد داده‌های موجود در همان دسته هستند.

برای استفاده از داده‌های موجود برای آموزش، اعتبارسنجی و تست آزمایش شبکه عصبی، ابتدا باید روی داده‌های ورودی پیش پردازش انجام شود. داده‌های ورودی و خروجی به صورت رابطه ۱۲ نرمال‌سازی می‌شوند:

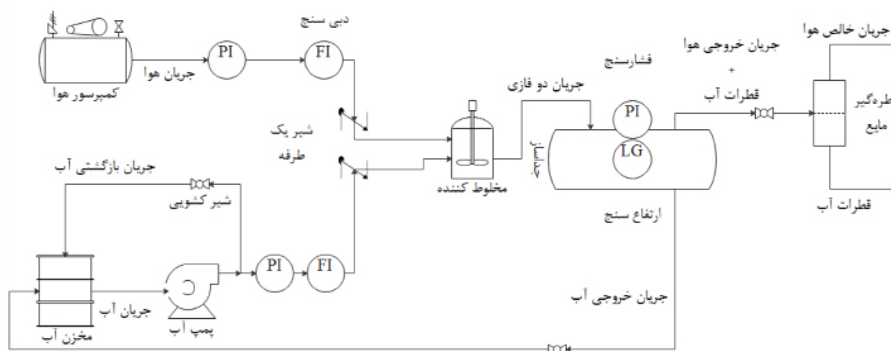
$$X_{norm} = \frac{X}{X_{max}} \quad (12)$$

که  $X_{max}$  و  $X_{norm}$  به ترتیب مقادیر نرمال‌سازی شده و مقادیر بیشینه متغیر  $X$  هستند. این روش یک روش معمول در بکارگیری شبکه عصبی است و به خصوص در مواردی که داده‌ها در محدوده وسیعی قرار گرفته باشند، باعث بهبود عملکرد شبکه عصبی می‌شود. در استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی پارامترهای تعداد لایه پنهان، تعداد نوروها در هر لایه پنهان، توابع فعال‌سازی نوروها، الگوریتم مورد استفاده در آموزش مدل و تابع عملکرد مدل نقش اساسی در بهبود عملکرد مدل دارند.

ابتدا داده‌های آموزش و آزمایش جدا شده و سپس متغیرهای ورودی و خروجی با استفاده از رابطه ۱۲



شکل ۱ ابعاد واقعی جداساز دو فازی گاز-مایع آزمایشگاهی



شکل ۲ پایلوت آزمایشگاهی دو فازی گاز-مایع

مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین قطر قطرات مایع، بر اساس مقیاس روی خطکش اندازه‌گیری شد. این عکسبرداری با سرعت ۳۰ فریم در ثانیه با استفاده از دوربین ۲۵ MPas با قابلیت بزرگنمایی تا ۱۰ برابر انجام شد و وزن قطرات مایع به دام افتاده با استفاده از ترازو با دقت ۰.۱/۰،۰۱۰ g انجام شد.

### تفسیر و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

آزمایش‌های آزمایشگاهی در حالت‌های مختلف ارتفاع مایع درون جداساز (۱۰، ۵۰ و ۹۰٪ کل ارتفاع جداساز) و با دبی‌های سیال و فشارهای مختلف انجام شد. هر کدام از آزمایش‌ها برای دو حالت متفاوت خروجی، یک بار در میانه جداساز (۴۵ cm) و یک بار در انتهای آن (۹۰ cm) انجام شد تا دو طول مؤثر مختلف جداساز در نظر گرفته شوند. لازم به

جریان هوا نیز که توسط کمپرسور هوا تأمین می‌شود، قبل از ورود به نقطه اختلاط، دبی جریان، دما و فشار آن به ترتیب توسط دبی‌سنج هوا و گیج‌های دما و فشار اندازه‌گیری می‌شوند. جریان دو فاز گاز و مایع پس از ورود به جداساز دو فازی به فازهای اصلی جدا می‌شوند. جداساز دو فازی گاز-مایع در سطوح مختلفی از مایع (۵۰، ۱۰ و ۹۰٪ از ارتفاع کل جداساز) و در نرخ‌های مختلفی از جریان مایع و گاز مورد بررسی قرار گرفت. یک فیلتر که طبق کاتالوگ می‌تواند قطرات مایع با قطر ۲۰ μm را جذب کند، در خروجی گاز نصب شد. اندازه‌گیری قطر قطرات آب در جریان هوا با استفاده از یک سیستم عکاسی انجام شد و فیلتر از سه جهت مختلف برای به حداقل رساندن اثرات شکست نور عکس‌برداری شد. سپس قطر قطرات مایع که در حین حرکت با هم ادغام نشده‌اند، با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویردیجی‌مایزر<sup>۱</sup> و



همانطور که در **جدول ۱** نشان داده شده است، هر چقدر سطح مایع در جداساز پایین تر باشد بیشینه اندازه قطر قطره مایع در خروجی گاز جداساز افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که با افزایش سطح آب از ۵۰٪ کل ارتفاع جداساز به ۹۰٪، بیشینه قطر قطرات آب به طور متوسط ۷۲٪ کاهش یافته و با کاهش سطح مایع از ۵۰٪ کل ارتفاع جداساز به ۱۰٪، بیشینه قطر قطرات آب به طور متوسط ۲۱۱٪ افزایش می‌یابد زیرا با کاهش ارتفاع سطح مایع، مسافت طی شده برای این که قطرات مایع به سطح مشترک گاز و مایع برسند افزایش یافته و مسلماً به طول بیشتری جهت جداسازی قطرات نیاز خواهد بود. لذا قطرات بزرگتر فرصت رسیدن به جریان مایع را از دست می‌دهند.

با توجه به **جدول ۱**، افزایش دبی گاز در ورودی نیز می‌تواند باعث افزایش بیشینه اندازه قطر قطرات مایع در خروجی گاز شود زیرا با بیشتر شدن دبی گاز در ورودی، قطرات مایع موجود در جریان گاز درون جداساز با سرعت بیشتری به سمت خروجی رفته و زمان کافی برای سقوط، رسیدن به جریان مایع و جداسازی را پیدا نمی‌کنند.

ذکر است که به منظور اطمینان از نتایج آزمایش‌ها، هر آزمایش سه مرتبه تکرار شد و نتایج در تمام موارد کاملاً هم خوانی داشتند. در این آزمایش‌ها، ارتفاع سطح مایع در جداساز، فاصله بین ورودی و خروجی جداساز، فشار و دبی گاز تغییر داده می‌شوند. **جدول ۱** برخی از نتایج آزمایش‌های انجام شده را به منظور تفسیر نتایج نشان می‌دهد. اولین و واضح‌ترین نتیجه‌ای که می‌توان از نتایج تجربی گرفت این است که طول مؤثر جداساز با بیشینه قطر قطرات مایع در خروجی گاز رابطه عکس دارد. همان‌طور که در تمام آزمایش‌های انجام شده مشاهده می‌شود، قطرات مایع در خروجی نزدیکتر به ورودی جداساز (طول مؤثر کمتر) بزرگتر هستند. دلیل این پدیده نیز در آن است که با کمتر شدن فاصله بین ورودی و خروجی جداساز، فرصت سقوط و جداسازی در اختیار قطرات مایع موجود در جریان گاز نیز کمتر می‌شود. البته باید به این نکته نیز توجه کرد که افزایش بیش از اندازه طول مؤثر می‌تواند باعث رخ دادن پدیده حمل مجدد قطرات مایع توسط جریان گاز و افزایش مجدد قطر قطرات مایع در خروجی گاز شود.

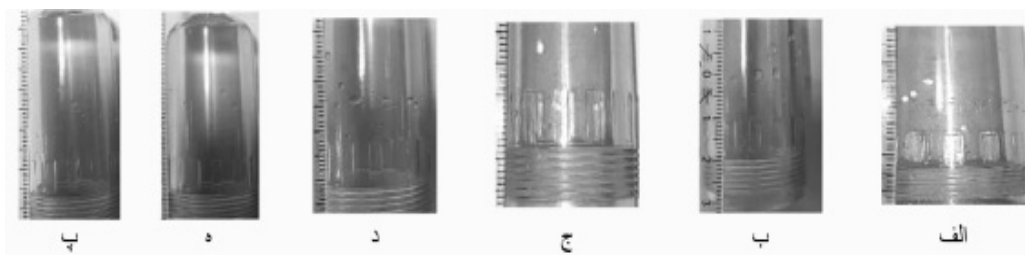
**جدول ۱** نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی با واحد پایلوت

ارتفاع مایع (%)	فشار	دما	دبی گاز	چگالی هوا	چگالی مایع	طول مؤثر بلند	نصف طول مؤثر	قطر قطره در انتهای طول مؤثر	طول قطره در نصف طول مؤثر
۱۰	۱۰۱/۲۲۵	۲۶	۱۹	۱/۲	۹۹۸	۰/۹	۰/۴۵	۳۱۵	۴۷۰
۱۰	۲۰۲/۴۵۰	۲۶	۲۳/۶	۲/۳۲	۹۹۸	۰/۹	۰/۴۵	۴۲۸	۶۳۸
۵۰	۱۰۱/۲۲۵	۲۶	۱۸/۹	۱/۲	۹۹۸	۰/۹	۰/۴۵	۱۲۹	۲۲۲
۵۰	۲۰۲/۴۵۰	۲۶	۲۳/۶	۲/۳۲	۹۹۸	۰/۹	۰/۴۵	۱۳۸	۴۳۹
۵۰	۲۵۳/۰۶۲	۲۶	۳۵/۴	۲/۹۱	۹۹۸	۰/۹	۰/۴۵	۴۵۰	۷۸۰
۹۰	۱۰۱/۲۲۵	۲۶	۱۸/۹	۱/۲	۹۹۸	۰/۹	۰/۴۵	۴۰	۶۲

نشان داده شده است؛ در حالی که فاصله نمونه‌گیر تا ورودی جداساز برابر با ۴۵ cm است قطرات آب با قطر  $780 \mu$  در خروجی گاز مشاهده شدند که در (و) نشان داده شده است. در حالت اول کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز برابر با  $1/8\%$  و در حالت دوم برابر با  $2/5\%$  بود. برای حالتی که سطح مایع جداساز برابر با  $10\%$  کل ارتفاع جداساز، فشار عملیاتی برابر با  $202/450 \text{ Pas}$  و دبی گاز برابر با  $23/6$  باشد، مقدار کسر حجمی مایع در خروجی گاز جداساز برابر با  $2/1\%$  به دست آمد. در حالتی که خروجی گاز جداساز در فاصله ۴۵ cm از ورودی نصب شود مقدار کسر حجمی مایع در خروجی گاز جداساز دوفازیدو فازی برابر با  $2/8\%$  به دست آمد. برای حالتی که سطح مایع جداساز برابر با  $90\%$  کل ارتفاع جداساز، فشار عملیاتی برابر با  $101/225 \text{ Pas}$  و دبی گاز برابر با  $18/9 \text{ m}^3/\text{h}$  باشد، مقدار کسر حجمی مایع در خروجی گاز جداساز برابر با  $0/5\%$  به دست آمد. در حالتی که خروجی گاز جداساز در فاصله ۴۵ cm از ورودی نصب شود، مقدار کسر حجمی مایع در خروجی گاز جداساز دوفازیدو فازی برابر با  $0/69\%$  به دست آمد.

### تفسیر نتایج شبیه‌سازی CFD و اعتبارسنجی و اصلاح رابطه نیمه تجربی

شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال جداساز دو فازی مایع-گاز با توجه به مراحل گفته شده انجام شد و نتایج شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال جداساز دو فازی مایع-گاز در ادامه بیان شده است.



شکل ۳ تصویر قطرات آب در جریان هوا در خروجی گاز جداساز

همان‌طور که در جدول ۱ دیده می‌شود برای حالتی که سطح مایع  $10\%$  ارتفاع کل جداساز، فشار  $101/225 \text{ Pa}$  و دبی گاز  $19 \text{ m}^3/\text{h}$  است، قطرات آب با قطر  $315 \mu$  در خروجی گاز مشاهده می‌شوند که در شکل ۳ (الف) نشان داده شده است. وقتی خروجی گاز در فاصله ۴۵ cm از ورودی نصب شود قطرات با قطر بزرگتر از  $315 \mu$  (برابر با  $470 \mu$ ) در خروجی گاز مشاهده می‌شوند که در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است. در حالتی که سطح مایع  $50\%$  ارتفاع کل جداساز، فشار عملیاتی برابر با  $101/225 \text{ Pa}$  و دبی گاز برابر با  $18/9 \text{ m}^3/\text{h}$  است، در خروجی گاز با فاصله ۹۰ cm از ورودی جریان دوفازیدو فازی قطرات با قطر  $129 \mu$  مشاهده شدند که در شکل ۳ (ج) نشان داده می‌شود. در حالتی که خروجی گاز در فاصله ۴۵ cm از ورودی جریان دو فازی نصب شود قطرات با قطر  $222 \mu$  در خروجی گاز مشاهده شدند که در شکل ۳ (د) نشان داده می‌شود. در حالتی که سطح مایع  $90\%$  ارتفاع کل جداساز، فشار عملیاتی برابر با  $101/225 \text{ Pas}$  و دبی گاز برابر با  $18/9 \text{ m}^3/\text{h}$  است، در خروجی گاز با فاصله ۹۰ cm از ورودی جریان دوفازیدو فازی قطرات با قطر  $40 \mu$  مشاهده شدند و در خروجی گاز با فاصله ۴۵ cm از ورودی جریان دو فازی قطرات آب با قطر حداکثری برابر با  $62 \mu$  مشاهده شدند.

در حالتی که نصف جداساز پر از مایع، فشار عملیاتی برابر با  $202/450 \text{ Pas}$  و دبی گاز برابر با  $35/4 \text{ m}^3/\text{h}$  است، وقتی فاصله نمونه‌گیر تا ورودی جداساز برابر با ۹۰ cm باشد قطرات آب با قطر  $450 \mu$  در خروجی گاز مشاهده شدند که در شکل ۳ (ه) در

خطای نسبی کمتر از ۸٪ در مقایسه با داده‌های تجربی معتبر است و می‌توان به نتایج حاصل از آن برای شرایطی که انجام آزمایش تجربی مربوطه ممکن نیست اعتماد کرد.

#### اصلاح معادله نیمه تجربی

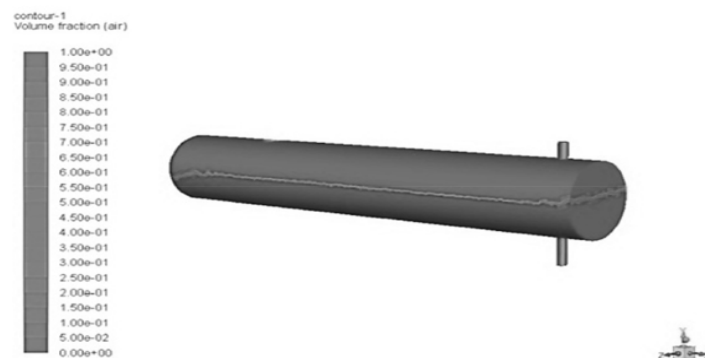
همان‌طور که پیش از این مشاهده شد، مقادیر تئوری به‌دست آمده برای طول مؤثر جداساز با استفاده از روابط نیمه تجربی آرنولد-استوارت در مقایسه با داده‌های تجربی به‌طور قابل توجهی کمتر بود. به عبارت دیگر، برای جداسازی قطرات مایع با قطر مشخص از جریان دو فاز و ورودی به جداساز، در صورتی که فاصله خروجی گاز از ورودی جداساز بیشتر از مقدار طول مؤثر به‌دست آمده از روابط نیمه تجربی در حالات مختلف ارتفاع سطح مایع باشد، در صورت صحیح بودن این روابط نیمه تجربی نباید قطرات مایع بزرگتر از مقدار مشخص شده در این روابط در خروجی گاز جداساز مشاهده شود. اما نتایج آزمایشگاهی نشان داد که طول مؤثر به‌دست آمده با استفاده از روابط نیمه تجربی برای جداسازی قطرات مایع با قطر مشخص از جریان دو فاز و ورودی جداساز کافی نبوده و طول مؤثر محاسبه شده کمتر از مقدار طول مؤثر لازم است. علت این خطای مشاهده شده را می‌توان در نحوه به‌دست آوردن این روابط نیمه تجربی جستجو کرد و فرض‌های ساده شونده‌ای که حین به‌دست آوردن این روابط نیمه تجربی استفاده شده‌اند.

شبیه‌سازی جداساز برای دو محل نمونه‌گیری متفاوت (انتهای جداساز با فاصله ۹۰ cm از ورودی جداساز و میانه جداساز با فاصله ۴۵ cm از ورودی جداساز) انجام شد. تمام نتایج به‌دست آمده از تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند.

برای ارتفاع مایع ۵۰٪، دبی گاز برابر با  $35/4 \text{ m}^3/\text{h}$  و فشار عملیاتی برابر با  $253/062 \text{ Pas}$  است. کانتورهای کسر حجمی هوا و چگالی ترکیب در جداساز به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. در این حالت کسر حجمی آب در جریان گاز خروجی به صورت تجربی برابر با ۱/۸٪ تعیین شد و نتایج دینامیک محاسباتی سیال نشان می‌دهد که در خروجی گاز جداساز ۱/۶۵٪ آب وجود دارد که در شکل ۴ نشان داده شده است. برای حالتی که نمونه‌گیر در فاصله ۴۵ cm از ورودی نصب شود، کسر حجمی آب در خروجی گاز به صورت تجربی برابر با ۲/۵٪ تعیین شد و نتایج دینامیک محاسباتی سیال، کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز را برابر با ۲/۴٪ نشان داد که در شکل ۶ نشان داده شده است.

خلاصه‌ای از نتایج مدل‌سازی عددی و مقایسه آن با داده‌های تجربی متناظر در جدول ۲ قابل مشاهده است.

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال ساخته شده با متوسط



شکل ۴ کانتور کسر حجمی هوا در جداساز در حالت نیمه پر و فاصله ۹۰ cm بین خروجی و ورودی

جدول ۲ نتایج شبیه‌سازی جداساز بدون منحرف کننده ورودی و مقایسه با نتایج تجربی

دبی مایع	۱/۱	دبی گاز	۳۵/۴
فاصله نمونه‌گیر (خروجی) تا ورودی جداساز		ارتفاع سطح مایع در جداساز (%)	
		۵۰	
		کسر حجمی مایع در خروجی گاز (%)	
۹۰ cm	تجربی	۱/۸	
	عددی	۱/۶۵	
۴۵ cm	تجربی	۲/۵	
	عددی	۲/۴	

مؤثر تئوری برای شرایط آن آزمایش محاسبه شود. طول مؤثر تئوری برای هر آزمایش با طول مؤثر واقعی مقایسه می‌گردد و ضریب تصحیح با تقسیم طول مؤثر واقعی بر طول مؤثر تئوری به دست می‌آید. جدول ۳ ضرایب تصحیح به دست آمده را برای آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد.

در تمامی آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده ضریب تصحیح بزرگتر از مقدار ۱ به دست آمد. این بدان معنی است که روابط نیمه تجربی عملاً طول مؤثر جداساز را کمتر از مقدار مورد نیاز محاسبه می‌کنند. در صورتی که جداساز دو فازی تنها بر پایه این روابط نیمه تجربی و بدون اعمال ضرایب تصحیح ارائه شده در این پژوهش طراحی شوند در صنعت قابل استفاده نخواهند بود و بازدهی جداسازی خوبی نخواهند داشت که علاوه بر ایجاد مشکلات عملیاتی باعث اتلاف وقت و هزینه‌های بسیار زیادی در صنایع نفت و گاز می‌شوند.

به منظور اصلاح طول مؤثر به دست آمده از روابط نیمه تجربی از ضریب تصحیح E در روابط نیمه تجربی استفاده می‌شود. ضریب تصحیح پیشنهادی به عنوان یک متغیر به سمت راست معادلات ۱ تا ۳ اضافه می‌شود. بدین ترتیب، معادلات ۱۳ تا ۱۵ به دست می‌آیند. شرایط هر کدام از این معادلات کاملاً مشابه با معادله بدون ضریب تصحیح متناظر با آن است.

$$D \times L_{eff} = 34.5 \times E \times \left( \frac{TZQ_{std.g}}{P} \right) \left[ \left( \frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{0.5} \quad (13)$$

$$D \times L_{eff} = 62.43 \times E \times \left( \frac{TZQ_{std.g}}{P} \right) \left[ \left( \frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{0.5} \quad (14)$$

$$D \times L_{eff} = 6.9 \times E \times \left( \frac{TZQ_{std.g}}{P} \right) \left[ \left( \frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{0.5} \quad (15)$$

نحوه تعیین ضریب E به این صورت است که در ابتدا توزیع قطر قطرات مایع در خروجی گاز جداساز با انجام آزمایش به دست می‌آید، سپس بیشینه قطر قطره مایع مشاهده شده در خروجی گاز در هر آزمایش به همراه دیگر شرایط آزمایش در رابطه نیمه تجربی مربوطه جایگذاری می‌شود تا طول

جدول ۳ ضرایب تصحیح به دست آمده از آزمایش‌های تجربی

طول موثر			نصف طول موثر		
ضریب تصحیح	طول موثر تئوری	طول موثر واقعی	ضریب تصحیح	طول موثر تئوری	طول موثر واقعی
۵	۰/۱۸	۰/۹	۲/۸	۰/۱۶	۰/۴۵
۷/۵	۰/۱۲	۰/۹	۴/۲	۰/۱۱	۰/۴۵
۹	۰/۱۰	۰/۹	۵	۰/۰۹	۰/۴۵
۱۰	۰/۰۹	۰/۹	۵/۵	۰/۰۸	۰/۴۵
۱۱	۰/۰۸	۰/۹	۶/۲	۰/۰۷۲	۰/۴۵
۴۵	۰/۰۲	۰/۹	۲۵	۰/۰۱۸	۰/۴۵

### ضرورت به کارگیری شبکه عصبی

همان‌طور که در **جدول ۳** نشان داده شده است با افزایش قطر قطرات مایع مقدار ضریب تصحیح روابط نیمه تجربی نیز افزایش یافته است. **جدول ۳** نشان می‌دهد که ضریب تصحیح E یک مقدار ثابت نداشته و در شرایط مختلف آزمایش مقادیر متفاوتی را به خود اختصاص می‌دهد. می‌توان با بررسی معادلات نیمه تجربی مورد مطالعه نیز این نتیجه را گرفت که این ضریب تصحیح تابعی از پارامترهای دما، فشار، ضریب درگ، ضریب تراکم‌پذیری گاز، چگالی گاز، چگالی مایع، دبی گاز، بیشینه قطر قطره مایع در خروجی گاز، طول مؤثر و قطر جداساز است. بنابراین به منظور این که بتوان از این ضریب تصحیح در معادله استفاده کرد باید رابطه بین آن و پارامترهای مؤثر بر آن را پیدا کرد. برای بررسی ارتباط بین ضریب تصحیح E و پارامترهای مؤثر بر آن، آنالیز حساسیت‌سنجی لازم خواهد بود. اما با توجه به این که کلیه پارامترهای تأثیرگذار از جمله دبی گاز، چگالی گاز، ضریب درگ و قطر قطره به هم وابسته هستند، تغییر یک پارامتر و ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها در شرایط آزمایشگاهی عملاً غیرممکن است. در نتیجه، انجام آنالیز حساسیت‌سنجی و تعیین رابطه کلی برای به دست آوردن ضریب تصحیح روابط نیمه تجربی برای شرایط مختلف عملیاتی، استفاده از روش‌های هوش محاسباتی را ایجاب می‌کند.

### طراحی و بهینه‌سازی شبکه عصبی

در استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی پارامترهای تعداد لایه پنهان، تعداد نورون‌ها در هر لایه پنهان، توابع فعال‌سازی نورون‌ها، الگوریتم مورد استفاده در آموزش مدل و تابع عملکرد مدل تأثیر زیادی در عملکرد مدل دارند. الگوریتم لوبنبرگ-مارکوارت<sup>۱</sup> به منظور حل مسائل حداقل مربعات غیرخطی قابل استفاده است. این الگوریتم در واقع از ترکیب دو روش دیگر (گاو-نیوتن و گرادیان کاهش‌ی<sup>۲</sup>) به دست آمده است. هر دو روش منشأ، الگوریتم تکراری به

حساب می‌آیند؛ بدین معنا که آن‌ها از یک سری محاسبات (بر پایه حدس‌هایی برای مقادیر x) به منظور پیدا کردن پاسخ استفاده می‌کنند. الگوریتم گرادیان کاهش‌ی از این نظر متفاوت است که در آن، پاسخ در هر تکرار با انتخاب مقادیری که مقدار تابع را کمینه می‌کند به روز می‌شود [۱۹].

در این پژوهش، حدس و خطا به منظور تعیین تمام پارامترها استفاده شده و الگوریتم لوبنبرگ-مارکوارت به عنوان الگوریتم آموزش‌دهنده شبکه عصبی برگزیده شد. توابع  $\log_{\text{sig}}$  و  $\text{tansig}$  نیز به عنوان توابع توابع فعال‌سازی برگزیده شده و خطای جذر میانگین مربعات به عنوان تابع عملکرد برای پیش‌بینی مدل در نظر گرفته شد.

در این پژوهش به منظور آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی شبکه عصبی، ۱۵ داده آزمایشگاهی و ۸۶ داده از نتایج شبیه‌سازی اعتبارسنجی شده CFD که در ۱۰۱ دسته داده (هر کدام از دسته داده‌ها دارای ۱۰ عنصر بودند) مرتب شدند، مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی این دسته‌های داده در پیوست قابل مشاهده است. از تعداد کل داده‌های وارد شده به شبکه عصبی، ۱۵٪ برای آموزش، ۱۵٪ برای اعتبارسنجی و ۷۰٪ برای آموزش شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفتند. در **جدول ۴** جزئیاتی از داده‌های گردآوری شده جهت آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی شبکه عصبی نشان داده شده است.

ده متغیر هر دسته از داده‌ها همان‌طور که از **جدول ۴** مشخص است، عبارتند از: دبی گاز، فشار جداساز، دمای جداساز، ضریب تراکم‌پذیری گاز، چگالی گاز، چگالی مایع، ضریب درگ، قطر قطره مایع، قطر جداساز و طول مؤثر جداساز. همان‌طور که در **جدول ۴** دیده می‌شود، دمای جداساز، ضریب تراکم‌پذیری گاز، قطر جداساز و چگالی مایع در تمامی آزمایش‌ها ثابت بودند.

1. Levenberg-Marquardt Algorithm  
2. Gradient Descent

جدول ۴ جزئیات داده های آزمایشگاهی به منظور آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی شبکه عصبی

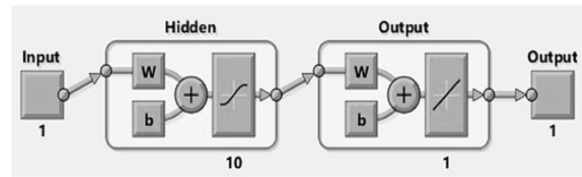
انحراف معیار	میانگین	حداکثر مقدار	حداقل مقدار	واحد	تعریف	پارامتر
۳۶/۱۷	۱۰۱/۹۴	۱۶۰	۴۰	m <sup>3</sup> /h.	دبی گاز	
۲۹,۸۲۳,۴۲	۱۰۹,۱۱۳,۹۴	۳۸۲,۳۳,۲۵۳	۱۰۱/۲۲۵	Pa	فشار جداساز	P
۰	۲۶	۲۶	۲۶	°C	دمای جداساز	T
۰	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	---	ضریب تراکم پذیری گاز	Z
۰/۳۳	۱/۲	۲/۸	۱/۱۲	kg/m <sup>3</sup>	چگالی گاز	
۰	۹۹۸	۹۹۸	۹۹۸	kg/m <sup>3</sup>	چگالی مایع	
۲۳/۳۶	۳/۷۱۶	۱۷/۶	۰/۶۴	---	ضریب درگ	
۰/۰۰۰۲۰۵	۰/۰۰۰۳۷۶	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۱	m	قطر قطره مایع	
۰	۰/۲۵۴	۰/۲۵۴	۰/۲۵۴	m	قطر جداساز	
۰/۱۲۱۴	۰/۴۱۰	۰/۸۵۷	۰/۲۴۵۶	m	طول مؤثر جداساز	

الگوریتم، آزمایش شده و بر حسب مقدار متوسط خطای مطلق برای اعتبارسنجی و آموزش شبکه عصبی تعداد بهینه نورون‌های لایه پنهان و تعداد بهینه لایه‌های پنهان شبکه عصبی تعیین می‌گردند. سپس، تعداد بهینه نورون‌ها در تک لایه پنهان برابر با ۱۰ نورون تعیین می‌شود. با افزایش تعداد نورون‌ها در تک لایه پنهان به بیشتر از ۱۰ داده، متوسط خطای مطلق شبکه عصبی برای آموزش و اعتبارسنجی افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش، زیاد شدن بیش از اندازه تعداد نورون‌ها در تک لایه پنهان و بیش‌برازش داده‌های ورودی است. وقتی تعداد نورون‌ها در لایه پنهان از میزان بهینه بیشتر شود، بیش‌برازش داده‌ها اتفاق افتاده و باعث بالا رفتن مقدار متوسط خطای مطلق شبکه عصبی خواهد شد. به همین منظور، شبکه عصبی با ۱۰ نورون در لایه پنهان محاسباتی تحت آموزش قرار می‌گیرد. در شکل ۷ ساختار شبکه عصبی ساخته شده نشان داده شده است.

از آن جا که مایعات تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شوند، چگالی آن‌ها با تغییر فشار دچار تغییر محسوسی نمی‌شود. پارامترهایی مانند فشار جداساز، ضریب تراکم‌پذیری گاز و دمای جداساز در معادلات نیمه تجربی برای شرایط عملیاتی ظاهر نمی‌شوند، اما به منظور مقایسه عملکرد شبکه عصبی در پیش‌بینی ضرایب تصحیح برای دو حالت مختلف (شرایط استاندارد و شرایط عملیاتی) در عناصر ورودی گنجانده می‌شوند. روش شبکه عصبی به کمک جعبه ابزار شبکه عصبی نرم افزار متلب و تغییراتی که در آن داده شد، برای پژوهش مدنظر پیاده سازی شد.

به منظور آموزش شبکه عصبی که توانایی عملکرد در مقیاس میدانی را داشته باشد نیاز است که داده‌های استفاده شده برای آموزش شبکه عصبی از جامعیت کامل و دقت کافی برخوردار باشند. جزئیات و محدوده داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۴ بیان شد. پس از پیش پردازش داده‌های آزمایشگاهی جهت آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی شبکه عصبی، لازم است که تعداد بهینه نورون‌ها در لایه پنهان شبکه عصبی تعیین شود. به همین منظور شبکه عصبی تک‌لایه در هر مرحله با تعداد نورون‌های متفاوت در تک‌لایه پنهان مطابق با

با توجه به **جدول ۵** مشاهده می‌شود که شبکه عصبی آموزش داده شده توسط الگوریتم آموزش‌دهنده لونیبرگ-مارکوارت بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک دارای خطای جذر میانگین مربعات قابل قبولی برای داده‌های آزمایش و آموزش است. ضریب همبستگی برای هر دو حالت آموزش و آزمایش شبکه عصبی برابر با  $0/99$  است. هرچه ضریب همبستگی به عدد  $1$  نزدیک‌تر باشد نشان دهنده توانایی الگوریتم آموزش‌دهنده در برآزش بهتر داده‌های ورودی برای آموزش و آزمایش بوده و نتایج پیش‌بینی شده حاصل از این الگوریتم به نتایج واقعی نزدیک‌تر بوده و در **شکل ۸** نشان داده شده است.

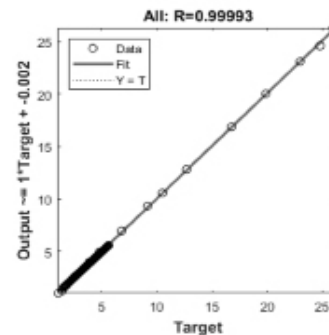
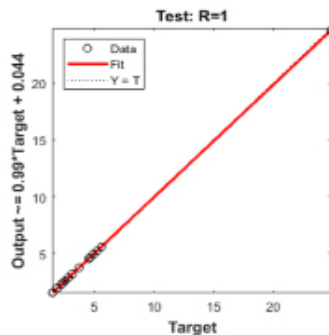
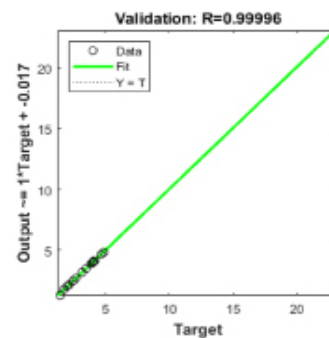
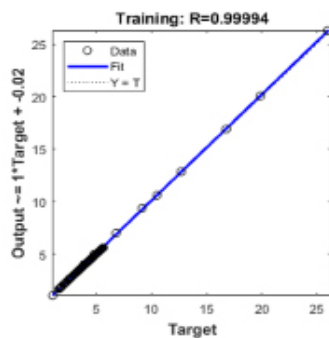


شکل ۷ ساختار شبکه عصبی ساخته شده با یک لایه پنهان محاسباتی شامل ۱۰ نورون

شبکه عصبی تک لایه آموزش داده شده با الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت که با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است، با استفاده از  $101$  دسته داده شامل  $10$  عنصر ( $1/010$  داده) که جزئیات آن‌ها در **جدول ۴** نشان داده شد آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش شد. عملکرد این شبکه عصبی در **جدول ۵** نشان داده شده است.

جدول ۵ عملکرد شبکه عصبی آموزش داده شده

هوش مصنوعی	الگوریتم آموزش دهنده	دسته داده‌ها	ضریب همبستگی ( $R$ )	خطای جذر میانگین مربعات (%)
شبکه عصبی	لونیبرگ-مارکوارت	آزمایش	$0/99$	$5/5$
		آموزش	$0/99$	$6/22$
		اعتبارسنجی	$0/99$	$5/51$



شکل ۸ نمودار رگرسیون برای شبکه عصبی آموزش داده شده

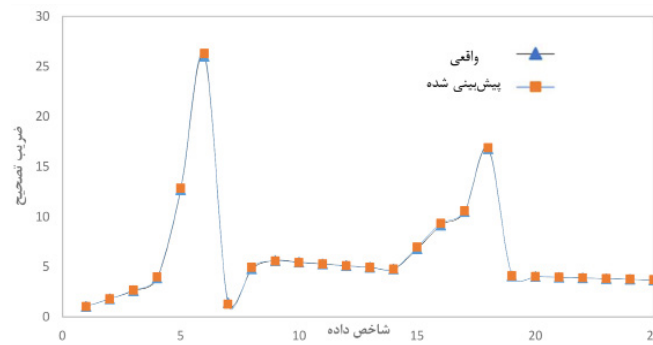
از پارامترها در حالی که سایر پارامترها ثابت می‌مانند به میزان ۲۵٪ تغییر (افزایش یا کاهش) یافته و میزان درصد تغییر نسبی نتیجه حاصل از پیش‌بینی توسط شبکه عصبی بررسی می‌شود. به این ترتیب مشخص می‌شود که با تغییر هر کدام از پارامترهای ورودی، نتیجه چند درصد نسبی تغییر می‌کند. در شکل ۱۰ نمودار قدر مطلق میزان تغییر نسبی نتایج حاصل از پیش‌بینی شبکه عصبی نشان داده شده و به ترتیب اهمیت پارامتر ورودی رسم شده است.

عدد متناظر با هر پارامتر ورودی در محور افقی نمودار در شکل ۱۰ در جدول ۶ بیان شده است.

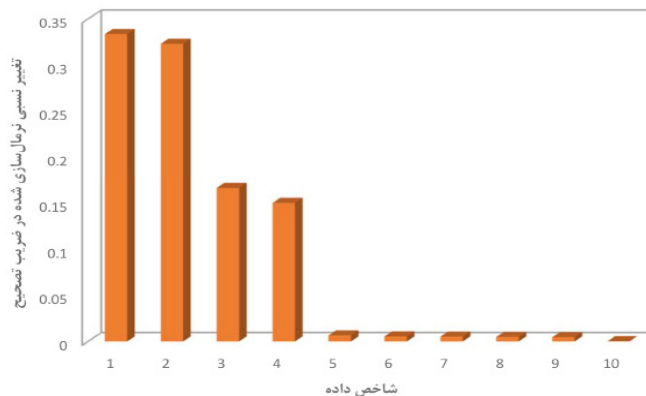
همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است، ضرایب تصحیح پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی آموزش داده شده نسبت به مقادیر واقعی خطای بسیار ناچیزی دارد. مقدار خطای جذر میانگین مربعات بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده ضرایب تصحیح توسط هوش مصنوعی آموزش داده شده برابر با ۰.۱٪ است.

#### آنالیز حساسیت‌سنجی

در این بخش مشخص می‌شود که هر کدام از داده‌های ورودی به شبکه عصبی تا چه میزان نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به همین منظور، برای سنجش اهمیت هر کدام از پارامترهای ورودی، هر کدام



شکل ۹ مقایسه ضرایب تصحیح پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی آموزش داده شده با مقادیر واقعی



شکل ۱۰ حساسیت‌سنجی پارامترهای ورودی به شبکه عصبی

جدول ۶ عدد متناظر با هر پارامتر ورودی در نمودار نشان داده شده در شکل ۱۰

پارامتر	عدد	پارامتر	عدد
قطر جداساز	۶	دبی گاز	۱
چگالی مایع	۷	چگالی گاز	۲
ضریب تراکم‌پذیری گاز	۸	ضریب درگ	۳
دمای جداساز	۹	طول مؤثر جداساز دما جداساز	۴
فشار جداساز	۱۰	قطر قطره مایع	۵



نسبی ضریب تصحیح  $1.01/66$  خواهد بود که نشان دهنده وابستگی شدید ضریب تصحیح به دبی گاز است. مقدار مطلق درصد تغییر نسبی ضریب تصحیح به ازای میزان تغییر  $25\%$  پارامترهای ورودی به شبکه عصبی در جدول ۷ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۰ دیده می‌شود که در بین پارامترهای ورودی به شبکه عصبی به ترتیب پارامترهای دبی گاز، چگالی گاز، ضریب درگ و طول مؤثر جداساز بیشترین تأثیر را بر ضریب تصحیح روابط تجربی طراحی جداساز دارند؛ به طوری که اگر دبی گاز  $25\%$  تغییر کند، مقدار مطلق تغییر

جدول ۷ مقدار مطلق درصد تغییر نسبی ضریب تصحیح به ازای میزان تغییر  $25\%$  پارامترهای ورودی به شبکه عصبی

پارامتر	$Q_g$	$\rho_g$	$C_D$	$L_{eff}$	$d_m$	$D$	$\rho_l$	$z$	$T$	$P$
درصد تغییر	$1.01/66$	$98/43$	$50/73$	$45/76$	۲	$1/65$	$1/6$	$1/5$	$1/4$	$0.95$

تعیین شدند.

نتایج زیر از این بخش‌های مختلف گرفته می‌شود:

- از نتایج آزمایش‌های تجربی با استفاده از واحد پایلوت جداساز آزمایشگاهی، این نتایج گرفته شدند که افزایش دبی گاز ورودی به جداساز و کاهش ارتفاع سطح مایع در جداساز منجر به افزایش کسر حجمی و بیشینه اندازه قطر قطره مایع در جریان خروجی گاز جداساز و در نتیجه افت عملکرد آن می‌شوند. افزایش فاصله خروجی گاز با ورودی جداساز در مورد آزمایش نیز باعث بهبود عملکرد جداساز شد.
- نتایج مدل دینامیک محاسباتی سیال شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل‌های حجم سیال و ذرات گسسته با خطای نسبی کمتر از  $8\%$  در مقایسه با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شد.
- یکی از روابط نیمه تجربی شناخته شده در طراحی جداساز برای شرایط مشابه واحد پایلوت جداساز مورد استفاده قرار گرفت. از مقایسه مقادیر حاصل از روابط نیمه تجربی و داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی نتیجه گرفته شد که این روابط خطای قابل توجهی دارند. به منظور جبران این خطا، افزودن یک ضریب تصحیح به معادلات این روش به منظور افزایش دقت آن مورد بررسی قرار گرفت.
- به دلیل تأثیرپذیری ضریب تصحیح افزوده شده به روابط نیمه تجربی از چندین پارامتر مختلف و عدم امکان تولید داده‌های کافی به منظور انجام آنالیز

## نتیجه‌گیری

جداسازها بخش مهمی از تجهیزات سطحی را در صنعت نفت و گاز تشکیل می‌دهند. طراحی جداسازها فرآیند پیچیده‌ای بوده و روش‌های دقیق طراحی آن‌ها به دلیل صرفه بالای اقتصادی در اختیار عموم نیست. روش‌های نیمه تجربی طراحی جداساز به دلیل فرض‌های ساده کننده در فرآیند به دست آوردن روابط، قابل اعتماد نیست. یک روش پرترفدار دیگر طراحی جداساز، مدل‌سازی عددی با استفاده از دینامیک محاسباتی سیال است، اما این روش نیز به منظور این که قابل استفاده باشد باید با نتایج تجربی اعتبارسنجی شود. در این پژوهش، یک واحد پایلوت جداساز آزمایشگاهی ساخته شد، شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال برای آن انجام شده و سپس نتایج مدل‌سازی عددی با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شدند. در مرحله بعد، پس از مقایسه نتایج یک رابطه نیمه تجربی شناخته شده با داده‌های تجربی و مشاهده خطای بالای آن، معادلات این رابطه نیمه تجربی با اضافه کردن یک ضریب تصحیح به آن مورد اصلاح قرار گرفت. تأثیر پارامترهای مؤثر بر این ضریب تصحیح با طراحی یک شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از داده‌های خروجی آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال اعتبارسنجی شده به دست آمده و پارامترهای غالب مؤثر بر آن

حساسیت سنجی، از مدل شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال اعتبارسنجی شده به منظور تولید داده‌های قابل اعتماد بیشتر و استفاده شد. سپس مجموعه داده‌های مدل عددی و آزمایش‌های تجربی به منظور طراحی یک شبکه عصبی مصنوعی و بررسی رابطه بین ضریب تصحیح و پارامترهای مؤثر بر آن به کار گرفته شدند. نتایج شبکه عصبی نشان داد که پارامترهای دبی گاز ورودی، چگالی فاز گاز، ضریب درگ و طول مؤثر جداساز پارامترهای غالب مؤثر بر ضریب تصحیح هستند.

### علائم و نشانه‌ها

D: قطر جداساز m

$\rho_g$ : چگالی گاز  $\text{kg/m}^3$

$L_{\text{eff}}$ : طول مؤثر جداساز m

$\rho_l$ : چگالی مایع  $\text{kg/m}^3$

T: دمای جداساز  $^{\circ}\text{C}$

$C_D$ : ضریب درگ ----

Z: ضریب تراکم گاز ----

dm: قطر قطرات مایع Micron

P: فشار جداساز Pa

$Q_g$ : دبی حجمی گاز  $\text{m}^3/\text{h}$

$v_t$ : سرعت حد m/s

$Q_l$ : دبی حجمی مایع  $\text{m}^3/\text{h}$

S: نسبت لغزش ----

X: کیفیت گاز ----

$\sigma$ : تنش سطحی دو فاز  $\text{N/m}$

K: خمیدگی ناحیه ای بین فازهای ----

$\delta$ : تابع تغییر دیراک ----

N: بردار عمودی سطح ----

R: قطر حباب گاز m

A: کسر حجمی گاز ----

v: سرعت m/s

Re: عدد رینولدز ----

$\mu$ : ویسکوزیته Pa.s

tr: زمان ماند s

g: شتاب گرانشی  $\text{m/s}^2$

B: زاویه خط مماس بر سطح تماس دو فاز  $^{\circ}$

$m_g$ : دبی جرمی گاز  $\text{kg/h}$

$m_l$ : دبی جرمی مایع  $\text{kg/h}$

$\rho_c$ : چگالی فاز پیوسته  $\text{kg/m}^3$

$\rho_d$ : چگالی فاز پراکنده  $\text{kg/m}^3$

$\mu_c$ : ویسکوزیته فاز پیوسته Pa.s

$\mu_d$ : ویسکوزیته فاز پراکنده Pa.s

$D_p$ : قطر داخلی لوله m

$v_c$ : سرعت سطحی فاز پیوسته m/s

$Y_d$ : کسر جرمی قطرات با قطر بزرگتر از  $d_m$  ----

### مراجع

- [1] Fewel Jr, K, Kean J A (1992) Computer modeling aids separator retrofit, Oil and Gas Journal, (United States), 90: 27.
- [2] Wilkinson D, Waldie B (1994) CFD and experimental studies of fluid and particle flow in horizontal primary separators, Chemical Engineering Research and Design, 72, 2: 189-196.
- [3] Wilkinson D, Waldie B, Nor M M, Lee H Y (2000) Baffle plate configurations to enhance separation in horizontal primary separators, Chemical Engineering Journal, 77, 3: 221-226.
- [4] Qaroot Y F (2013) Simulation of three-phase separator performance, The Petroleum Institute (United Arab Emirates).
- [5] Hansen E W, Celius H K, Hafskjold B (1995) Fluid flow and separation mechanisms in offshore separation equipment, International Symposium On Two-Phase Flow Modelling and Experimentation.
- [6] Laleh A P, Svrcek W Y, Monnery W D (2012) Design and CFD studies of multiphase separators—a review, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 90, 6: 1547-1561.
- [7] Ghaffarkhah A, Shahrabi M A, Moraveji M K, Eslami H (2017) "Application of CFD for designing conventional three phase oilfield separator, Egyptian Journal of Petroleum 26, 2: 413-420.
- [8] Acharya T, Casimiro L (2020) Evaluation of flow characteristics in an onshore horizontal separator using computational fluid dynamics, Journal of Ocean Engineering and Science, 5, 3: 261-268.

- [9] Ahmed T, Russell P A, Hamad F, Gooneratne S (2019) Experimental analysis and computational-fluid-dynamics modeling of pilot-scale three-phase separators, *SPE Production and Operations* 34, 04: 805-819.
- [10] Frank M, Kamenicky R, Drikakis D, Thomas L, Ledin H, Wood T (2019) Multiphase flow effects in a horizontal oil and gas separator, *Energies*, 12, 11: 2116.
- [11] Ghaffarkhah A, Dijvejin Z A, Shahrabi M A, Moraveji M K, Mostofi M (2019) Coupling of CFD and semiempirical methods for designing three-phase condensate separator: case study and experimental validation, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9, 1: 353-382.
- [12]. Fadaei M, Ameri M J, Rafiei Y, Ghorbanpour K (2021) A modified semi-empirical correlation for designing two-phase separators, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205: 108782.
- [13]. Manual F (2005) Manual and user guide of Fluent Software, Fluent Inc 597.
- [14]. Fadaei M, Ameli F, Hashemabadi S H (2019) Experimental Study and CFD Simulation of Two-phase Flow Measurement Using Orifice Flow Meter.
- [15] Khan J R (2013) Comparison between discrete phase model and multiphase model for wet compression, *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, American Society of Mechanical Engineers.
- [16] Kuang S, Qi Z, Yu A B, Vince A, Barnett G D, Barnett P J (2014) CFD modeling and analysis of the multiphase flow and performance of dense medium cyclones, *Minerals Engineering* 62: 43-54.
- [17] Padoin N, Dal'Toé A T, Rangel L P, Ropelato K, Soares C (2014) Heat and mass transfer modeling for multicomponent multiphase flow with CFD, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 73: 239-249..
- [18] Demuth H B, Beale M H, De Jess O, Hagan M T (2014) *Neural network design*, Martin Hagan.
- [19] Hagan M T, Menhaj M B (1994) Training feedforward networks with the Marquardt algorithm, *IEEE transactions on Neural Networks*, 5, 6: 989-993.
- [21] Sajja P S (2021) *Introduction to artificial intelligence*, Illustrated Computational Intelligence, Springer, 1-25.
- [22] Patel A R, Ramaiya K K, Bhatia C V, Shah H N, Bhavsar S N (2021) Artificial intelligence: prospect in mechanical engineering field—a review, *Data Science and Intelligent Applications*, 267-282.
- [23] Shoghl S N, Naderifar A, Farhadi F, Pazuki G (2021) Optimization of separator internals design using CFD modeling in the Joule-Thomson process, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 89: 103889.



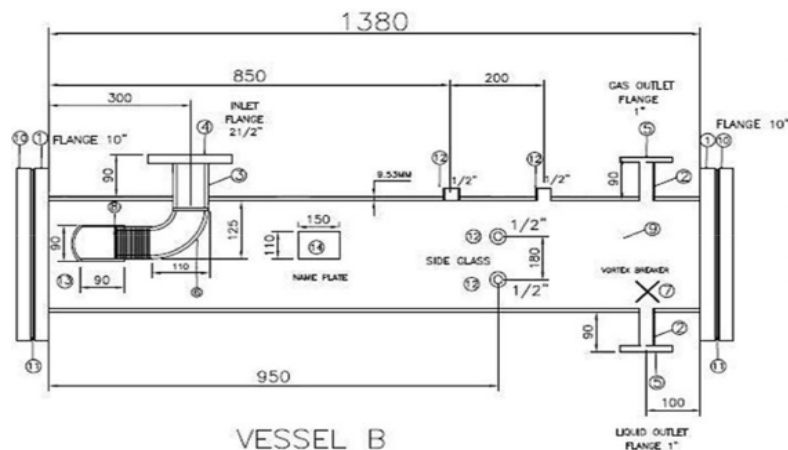


Fig. 1 The designed liquid-gas two-phase separator.

The two-phase flow of gas and liquid is separated into the original phases after entering the two-phase separator. The separation is performed by gravity. The two-phase gas-liquid separator was examined in different gas-liquid interface levels (10, 50, and 90% of total separator height) and in different liquid and gas flow rates. A filter, which according to its catalog can absorb liquid droplets with diameters as low as 20 microns, was installed at the gas outlet. To evaluate the performance of the filter, it was installed on the gas flow loop, and water droplets were injected into the gas flow using a syringe. After three tests and measuring the weight of the filter, its operating efficiency was determined to be 90 percent, and it was observed that it traps at least 90% of the water droplets in the gas flow. The water droplet diameter measurement in the air flow was conducted using a photography system, and the filter was photographed from three different directions to minimize the effects of light refraction. Finally, the diameter of liquid droplets which did not coalesce while moving was determined according to the scales on the scaled ruler using Digimizer image processing software and maximum, minimum, and mean values for liquid droplet diameter were measured. Furthermore, the volume fraction of water droplets in the air flow was determined by weighing. The photography was performed at the rate of 30 frames per second using a 25 MP camera capable of up to 10 times magnifying and the weighing of trapped liquid droplets was conducted using a scale with the accuracy of 0.01 grams.

## Results and Discussion

Separators are one of the most important part of surface equipment in the oil and gas industry. The design of separators is a complex procedure, and the exact methods of their design are not available to the public due to their high economic efficiency. The semi-empirical methods of separator design are not reliable due to simplifying assumptions in the process of obtaining relationships. Another popular

method of separator design is numerical modeling using computational fluid dynamics, but this method must also be validated with experimental results in order to be usable. In this study, a pilot laboratory separator unit was constructed, computational fluid dynamics simulations were performed for it, and then the results of numerical modeling were validated with experimental data. In the next step, after comparing the results of a known quasi-experimental relation with the experimental data and observing its high error, the equations of this quasi-experimental relation were corrected by adding a correction factor to it. The effect of effective parameters on this correction factor was obtained by designing an artificial neural network using the output data of experimental experiments and simulation of the accredited fluid computational dynamics and the dominant effective parameters were determined.

The following results are taken from these different sections:

- From the results of experimental experiments using a laboratory separator pilot unit, it was concluded that increasing the inlet gas flow to the separator and decreasing the height of the liquid surface in the separator leads to an increasing in the volume fraction and maximum diameter of the liquid droplet in the separator gas outlet. Its performance declines. Increasing the distance between the gas outlet and the separator inlet in the test case also improved the separator performance.
- The results of the simulated fluid dynamics model were validated using fluid volume and discrete particle models with a relative error of less than 8 percent in comparison with the experimental data.
- One of the known quasi-experimental relationships in separator design was used for similar conditions to the separator pilot unit. Comparing the values obtained from quasi-experimental relationships and the data obtained from experimental experiments, it was concluded that these relationships have significant errors. In order to compensate for this error, the

addition of a correction factor to the equations of this method was considered to increase its accuracy.

• Due to the effectiveness of the correction coefficient added to the quasi-experimental relationships of several different parameters and the impossibility of producing sufficient data to perform sensitization analysis, the accredited fluid computational dynamics simulation model was used to produce more reliable data. Then, numerical model data sets and experimental experiments were used to design an artificial neural network and investigate the relationship between the correction factor and the parameters affecting it. The results of the neural network showed that the parameters of inlet gas flow rate, gas phase density, drag coefficient and effective separation length are the dominant parameters affecting the correction coefficient.

#### References

1. Wilkinson D, Waldie B (1994) CFD and experimental studies of fluid and particle flow in horizontal primary separators. *Chemical engineering research & design*, 72, 2: 189-196.
2. Wilkinson D, Waldie B, Nor M M, Lee H Y (2000) Baffle plate configurations to enhance separation in horizontal primary separators. *Chemical Engineering Journal*, 77, 3: 221-226.
3. Qaroot Y F (2013) Simulation of three-phase separator performance (Doctoral dissertation, The Petroleum Institute (United Arab Emirates)).
4. Pourahmadi Laleh A, Svrcek W Y, Monnery W (2012) Computational fluid dynamics-based study of an oilfield separator--Part I: a realistic simulation. *Oil and Gas Facilities*, 1, 06: 57-68.
5. Ghaffarkhah A, Shahrabi M A, Moraveji M K, Eslami H (2017) Application of CFD for designing conventional three phase oilfield separator, *Egyptian journal of petroleum*, 26, 2: 413-420.
6. Acharya T, Casimiro L (2020) Evaluation of flow characteristics in an onshore horizontal separator using computational fluid dynamics, *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5, 3: 261-268.