

طراحی سیستم فازی مبتنی بر جدول ارجاع جهت مدلسازی و پیش بینی ضریب نفوذ جرم در نانوسیالات

حسین بیکی*

استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، قوچان، ایران

چکیده

در این پژوهش با استفاده از طراحی یک سیستم استنتاج فازی مبتنی بر جدول ارجاع نفوذ جرم اسید بنزوئیک در نانوسیالات پایه آبی گاما آلومینا و سیلیکا مدلسازی و پیش بینی شده است. همچنین برای ارزیابی سیستم فازی طراحی شده، ضریب نفوذ اسید بنزوئیک در نانوسیال در دمای ثابت 20°C با استفاده از یک روش ساده و ارزان اندازه گیری شد و با نتایج مدل فازی مقایسه شده است. نتایج نشان دادند که سیستم فازی طراحی شده با دقت بالایی می‌تواند فرآیند نفوذ جرم اسید بنزوئیک در نانوسیالات را تقلید کند. انحراف بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل فازی برای نانوسیالات گاما آلومینا و سیلیکا به ترتیب حدود 0.939 و 0.997 می‌باشد. اندازه گیری ضریب نفوذ در نانوسیالات نشان داد که در غلظت‌های پایین نانوذرات، ضریب نفوذ تغییری ندارد. اما با افزایش غلظت نانوذرات سیلیکا کاهش قابل ملاحظه ای در ضریب نفوذ اسید بنزوئیک مشاهده شد، بطوریکه در نسبت حجمی 0.8% ضریب نفوذ تا 35% کاهش می‌یابد. عواملی چون غلظت نانوذرات، جنس نانوذرات و نوع آزمایش جهت تعیین میزان نفوذ جرم، به شدت می‌تواند روی فرآیند نفوذ جرم در نانوسیالات تاثیر گذار باشد. **واژه‌های کلیدی:** سیستم استنتاج فازی، ضریب نفوذ، اسید بنزوئیک، جدول ارجاع.

Design of Fuzzy System Based on Look up Table for Modeling and Predicting Diffusional Mass Transfer in Nanofluids

H. Beiki

Department of Chemical Engineering, Quchan University of Advanced Technology, Quchan, Iran

Abstract

In this study, a fuzzy inference system based on look up table was used for modeling and predicting the diffusion coefficient of benzoic acid in the water based γ -Alumina and Silica nanofluids. Due to evaluate the designed fuzzy system, Nanofluids Diffusion coefficients of benzoic acid at constant temperature of 20°C were measured with using a simple and inexpensive technique. The results revealed that the designed fuzzy system could accurately mimic the diffusional mass transfer in nanofluids. The deviation between fuzzy model and experiments for γ -Alumina and Silica nanofluids were about 0.939 and 0.997, respectively. The measurements showed that nanoparticles at low concentration did not have a significant effect on benzoic acid diffusion in nanofluids relative to that in pure water. But diffusion in silica nanofluids strongly reduced at high concentration of nanoparticles, as in volume fraction of 0.8% diffusion coefficient decreased up to 35% relative to that in base fluid. Such factors as the type of tests to determine the diffusion coefficient in nanofluids, nanoparticles concentration and type, could strongly influence of diffusional mass transfer in nanofluids.

Keywords: Fuzzy Inference System, Diffusion Coefficient, Benzoic acid, Look up Table.

[۱۳، ۱۴]. در مورد فرآیند جذب گاز در نانوسیالات بیشتر محققان

گزارش داده‌اند که نانوذرات می‌توانند ضریب انتقال جرم را افزایش دهند [۱۵-۱۷]. اگرچه تعدادی از مطالعات نشان می‌دهند که نرخ انتقال جرم در نانوسیالات کاهش می‌یابد و این کاهش با افزایش غلظت نانوذرات بیشتر می‌شود [۱۸-۲۰]. در جدول ۱ به طور خلاصه نتایج حاصل از برخی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه تعیین ضریب انتقال جرم و جذب در نانوسیالات ارائه شده است.

از آنجا که اساس انتقال جرم را نفوذ مولکولی تشکیل می‌دهد، بنابراین داشتن مقادیر ضریب نفوذ در محاسبات نرخ انتقال جرم در واحدهای شیمیایی صنایع مختلف ضروری است. با توجه به اهمیت، داشتن اطلاعات ضریب نفوذ، گروه دوم از مطالعات، بر روی ضریب نفوذ مولکولی در نانوسیالات متمرکز شده است. تحقیقات معدود صورت گرفته در این زمینه نتایج متناقضی را ارائه داده‌اند. مطابق با تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده بر روی ضریب نفوذ جرم در نانوسیالات، اثر نانوذرات بر ضریب نفوذ همانگونه که در جدول ۲ نشان داده شده است در سه گروه افزایش، کاهش و بدون تغییر تقسیم می‌شود. بطور کلی

۱- مقدمه

سوسپانسیون‌های رقیق و پایدار حاوی نانوذرات به عنوان نانوسیال معرفی می‌شوند. بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه نانوسیالات مربوط به انتقال گرما در آن‌ها است [۱]. مطالعات مربوط به انتقال حرارت در نانوسیالات نشان می‌دهند که حضور نانوذرات در سیال پایه انتقال گرما را در مقایسه با سیال خالص افزایش می‌دهند [۲-۱۰]. مطابق با نتایج مطلوب اثر نانوذرات بر فرآیند انتقال گرما و همچنین وجود مکانیسم‌های مشابه با انتقال جرم، فرآیند انتقال جرم در نانوسیالات نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱، ۱۲]. تحقیقات بر روی اثر نانوذرات بر فرآیند انتقال جرم را می‌توان در دو گروه طبقه بندی کرد. دسته اول مطالعات مربوط به ضرایب انتقال جرم در نانوسیالات می‌باشد. بیشتر تحقیقات انجام شده در این زمینه افزایش در انتقال جرم در یک نسبت حجمی بهینه از نانوذرات در سیال پایه را گزارش داده‌اند [۱۱، ۱۲]. اگرچه در برخی از گزارش‌ها، در محدوده غلظت نانوذرات مورد استفاده در آزمایش‌ها، ضریب انتقال جرم با غلظت نانوذرات افزایش یافته است

های آزمایشگاهی بیشتری برای درک اثر نانوذرات بر مکانیسم نفوذ مولکولی نیاز است. احتمالاً می‌توان گفت عواملی چون روش اندازه گیری ضریب نفوذ، نوع، شکل و اندازه نانوذرات و فاز اجزاء نفوذ کننده و جنس سیال پایه بر نتایج اندازه گیری‌ها تاثیر گذار باشد.

بعضی از مطالعات نشان می‌دهند که نانوذرات انتقال جرم نفوذی را افزایش می‌دهد، در حالی که سایر تحقیقات هیچ گونه افزایش یا کاهش در نفوذ جرم درون نانوسیالات را نشان نمی‌دهند. بنابراین مطابق با جدول ۲ در نتایج تجربی گزارش شده در رابطه با اثر نانوذرات بر ضریب نفوذ جرم تناقض وجود دارد. در نتیجه به تحقیقات و داده-

جدول ۱- برخی از نتایج مربوط به پژوهش‌های انجام شده در زمینه ضریب انتقال جرم

نام پژوهشگر	سیال پایه-نانوذرات (اندازه nm)	محدوده غلظت نانوذرات (حجمی)	بیشینه افزایش (%)
بیکی و همکاران [۲۱]	فری-فروسیناید پتاسیوم و هیدروکسید سدیم در آب- TiO ₂ (۱-۳) و Al ₂ O ₃ (۴۰)	۰/۰۱-۰/۰۵ (TiO ₂) ۰/۰۰۵-۰/۰۲۵ (Al ₂ O ₃)	۱۸ (در ناحیه آشفته) ۱۶/۸ و ۱۰ (به ترتیب در ناحیه آرام و آشفته)
کشیشیان و همکاران [۲۲]	فری-فروسیناید پتاسیوم و هیدروکسید سدیم در آب- SiO ₂ (۷-۱۳)	۰/۰۰۰۲۲۹-۰/۰۱۷۸۶	۲۱ (در ناحیه آرام) در ناحیه آشفته افزایشی مشاهده نشد.
سارا و همکاران [۱۴]	فری-فروسیناید پتاسیوم و کربنات پتاسیوم در آب- CuO (۳۰-۵۰)	۰/۳۹-۱/۹۴	۵۰
روننا و همکاران [۱۳]	کروزن-SiO ₂ (H18)	۰/۰۱-۰/۱	۴۵
رحمتمند و همکاران [۲۳]	آب-SiO ₂ (۱۵) و Al ₂ O ₃ (۲۰) و Fe ₃ O ₄ (۴) و CNTs (قطر ۸ یا طول ۱۰ میکرومتر) متیل دی اتانول آمین و دی اتانول آمین-CNTs (قطر ۸ یا طول ۱۰ میکرومتر)	۰/۰۲-۰/۱ (وزنی) ۰/۰۲ (وزنی)	۲۱ (در ۰/۱)، ۱۸ (۰/۱)، ۲۴ (۰/۰۲) و ۳۴ (۰/۰۲) ۲۳
اسماعیلی و همکاران [۲۴]	آب-SiO ₂ (۱۴) و اکسید گرافن ورقه‌ای، EGO	۰/۰۱-۰/۵ (وزنی SiO ₂) ۰/۰۰۵-۰/۰۲۵ (وزنی EGO)	۱۰ (کاهش با نانوذرات SiO ₂) ۴۰ (افزایش با نانوذرات EGO)
لی و همکاران [۱۷]	متانول-SiO ₂ (۱۵) و Al ₂ O ₃ (۴۵)	۰/۰۱	۸ (افزایش با نانوذرات SiO ₂) و ۹ (کاهش با نانوذرات Al ₂ O ₃)
اشرف منصوری و همکاران [۲۵]	تولون-SiO ₂ (۱۴)	۰/۰۰۱-۰/۱	۳۱

جدول ۲- کارهای آزمایشگاهی انجام شده بر روی ضریب نفوذ جرم در نانوسیالات

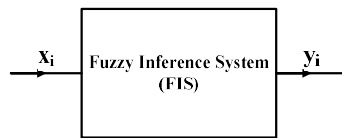
نام پژوهشگر	نانوسیال (اندازه nm)	روش آزمایش (محدوده غلظتی بر حسب درصد حجمی)	بیشترین نسبت افزایش
کریشنامورتی و همکاران [۲۶] (Krishnamurthy et al.)	Al ₂ O ₃ -H ₂ O (۲۰)	نفوذ رنگ-عکس برداری میکروسکوپی (۰/۱-۱)	تقریباً ۱۴ برابر در ۰/۵٪
فانگ و همکاران [۲۷] (Fang et al.)	Cu-H ₂ O (۲۵)	نفوذ رنگ-عکس برداری (۰/۱-۰/۵)	تقریباً ۲۶ برابر در ۰/۵٪
ویلیوکس و کولومب [۲۸] (Veilleux and Coulumbe)	Al ₂ O ₃ -H ₂ O (۱۰)	نفوذ رنگ-TIRF (۰/۱-۴)	۱۰ برابر در ۲٪
جراردی و همکاران [۲۹] (Gerardi et al.)	Al ₂ O ₃ -H ₂ O (۴۲/۶)	خود نفوذی آب-PFG-NMR (۱-۶)	۰/۹ برابر در ۶٪
تورانو تولماچو [۳۰] (Turanov and Tolmachev)	Silica-H ₂ O (۲۸/۶)	خود نفوذی آب-PFG-NMR (۳/۸-۲۳)	۰/۷ برابر در ۲۳٪
اوزتورک و همکاران [۳۱] (Ozturk et al.)	Al ₂ O ₃ -H ₂ O (۲۰)	نفوذ رنگ-میکروکانال (۰/۲۵-۱)	۱ برابر (بدون افزایش)

۱ برابر (بدون افزایش)	نفوذ رنگ- FCS (۰/۱-۱/۷) (۰/۱-۱)	Silica- H ₂ O (۲۲) Al ₂ O ₃ -H ₂ O	سوبا- راو و همکاران [۳۲] (Subba-Rao et al.)
۱ برابر (بدون افزایش)	انتقال جرم اکسیژن- سلول پخش غشایی (۰/۵-۵)	Silica- H ₂ O (۱۷-۲۴)	فنگ و جانسون [۳۳] (Feng and Johnson)
تقریباً ۱ برابر	نفوذ ترت بوتانول و خودنفوذی آب- PFG-NMR (۰/۰۰۵-۱)	Silica- H ₂ O (۷-۱۴)	اشرف منصوری و همکاران [۳۴] (Ashrafmansouri et al.)
۱ برابر (بدون افزایش)	نفوذ اسید بنزوئیک در نانوسیالات (۰/۰۲۵-۰/۸)	Al ₂ O ₃ -H ₂ O (۱۰-۲۰)	منوچهریان فرد و بیکی [۳۵]

پایه آبی در دمای ثابت ۲۰ °C اندازه گیری شده است و سپس به کمک نتایج حاصل سیستم مورد نظر به روش طراحی سیستم فازی بر مبنای جدول ارجاع مدلسازی و شبیه سازی شده است. نانوسیالات با غلظت های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ درصد حجمی از نانوذرات سیلیکا به عنوان سیال کاری در انجام آزمایش ها استفاده شده اند.

۲- طراحی سیستم فازی مبتنی بر جدول ارجاع

جهت مدلسازی فرآیندهایی که محتویات آنها در دسترس نیست، می توان از مدلسازی فازی استفاده کرد. در واقع چنین فرآیندهایی شبیه به یک جعبه سیاه هستند که فقط به اطلاعات ورودی و خروجی آنها دسترسی وجود دارد. به ازای هر ورودی دلخواه یک خروجی از فرایند موجود است. این اطلاعات ورودی و خروجی در واقع همان داده های آزمایشگاهی می باشند. در مدلسازی فازی مبتنی بر جدول ارجاع اطلاعات ورودی و خروجی (داده های آزمایشگاهی) مهم هستند و در واقع به جعبه سیاه (فرآیند) کاری نداریم. در واقع باید این اطلاعات ورودی و خروجی را به سیستم فازی تبدیل کرد. برای چنین فرآیندی، این نوع مدلسازی، ساده، اثرگذار و پایه ای است. یک سیستم استنتاج فازی با یک نوع ورودی و یک نوع خروجی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- سیستم فازی یک ورودی یک خروجی

اطلاعات ورودی و خروجی برای شکل ۱ به صورت زیر می باشد:

$$(x_i, y_i) \quad i=1,2,\dots,P \quad (1)$$

که در آن P تعداد داده های آزمایشگاهی می باشد. جهت طبقه بندی فضای ورودی و خروجی، باید محدود ورودی و خروجی را مشخص کرد:

از آنجا که انجام آزمایش (مدل تجربی) به مرتب پرخطرتر، پرهزینه تر و نیازمند صرف زمان بیشتری نسبت به مدل ریاضی می باشد، جهت مطالعه و تجزیه و تحلیل پارامترهای موثر بر یک سیستم بهتر است از مدل ریاضی استفاده شود [۳۶]. در واقع استفاده از یک مدل ریاضی مناسب، باعث می شود که پژوهشگران نیاز به انجام آزمایش های بیشتر و یا صرف هزینه های بیشتر نداشته باشند. از طرفی شرایط نامطلوبی که در آزمایش ها پیش می آید، به مراتب بیشتر از کارهای محاسباتی و ریاضی می باشد. همچنین با استفاده از مدل ریاضی مناسب می توان شرایط ایده آل و واقعی را با تغییرات گسترده در پارامترهای موثر بر سیستم، شبیه سازی نمود. جهت مدلسازی سیستم های پیچیده، غیرخطی، چند متغیره، همراه با درجه بالایی از عدم اطمینان و همچنین نبود دانش دقیق نمی توان از روش های مدلسازی مرسوم سود جوست. برای چنین سیستم هایی می توان از مدلسازی فازی استفاده کرد. مدلسازی فازی ابزار توانمندی در مدل کردن چنین سیستم هایی می باشد. کلمه فازی به معنی مبهم، نادقیق، کنگ و از این قبیل مفاهیم است و چون معادل فارسی برای آن استفاده نشده است، از کلمه "فازی" در متون استفاده می شود. استفاده از محاسبات نرم در سیستم های حاوی نانوسیالات در حوزه تعیین خصوصیات فیزیکی [۳۷-۴۲] و تعیین ضریب انتقال حرارت انجام شده است [۴۳، ۴۴].

با توجه به ضرورت انجام پژوهش های آزمایشگاهی و نظری بیشتر در زمینه انتقال جرم در نانوسیالات، ضریب نفوذ اسید بنزوئیک در نانوسیالات آب-اکسید آلومینیوم در کار قبلی [۳۵] اندازه گیری شد. در این پژوهش با تغییر نانوذرات، اندازه گیری ضریب نفوذ اسید بنزوئیک در نانوسیالات حاوی نانوذرات آبریز سیلیکا اندازه گیری و نتایج حاصل به یکی از روش های طراحی سیستم فازی مبتنی بر داده های ورودی و خروجی به نام جدول ارجاع^۱ (جدول جستجو) مدل شده است. در واقع بررسی اثر نوع، اندازه و خصوصیات نانوذرات تفاوت کار حاضر با کار قبل [۳۵] می باشد. همچنین در کار حاضر ضریب نفوذ در نانوسیالات با استفاده از روش طراحی سیستم فازی بر مبنای جدول ارجاع مدلسازی و شبیه سازی شده است.

در این پژوهش با استفاده از یک روش ساده و ارزان آزمایشگاهی اثر نانوذرات آبریز سیلیکا بر نفوذ جرم اسید بنزوئیک در نانوسیالات

¹ Look up table

بیشترین امتیاز مشخص می‌شود. بنابراین برای هر قاعده فقط یک امتیاز بدست می‌آید.

$$S_r^{final}(x_i, y_i) = \max_j S_r(x_i, y_i) \quad (7)$$

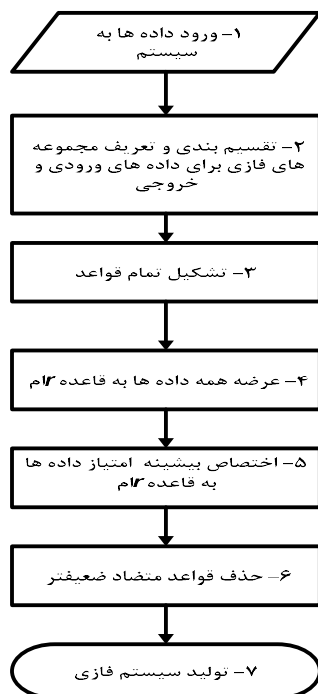
که در آن S_r^{final} بیشترین امتیاز قاعده r می‌باشد. شکل ۲ الگوریتم طراحی سیستم فازی مبتنی بر جدول ارجاع را نشان می‌دهد.

چون همه ترکیبات ممکن توابع عضویت ورودی و خروجی در نظر گرفته شده است، قواعدی ایجاد می‌شوند که با یکدیگر در تضاد هستند. در این حالت قواعد با ارزش کمتر حذف می‌شوند (مرحله ۶ شکل ۲). نهایتاً تعداد قواعد پیروز در مرحله ۶ شکل ۲، به تعداد توابع عضویت ورودی خواهند بود.

۳- بخش آزمایش

نانوسیالات به روش دو مرحله‌ای تهیه می‌شوند. در این روش ابتدا نانوذرات سیلیکا (US Research Nanomaterials, USA) با اندازه متوسط بین ۲۰ تا ۳۰ نانومتر به صورت تدریجی به آب بدون یون اضافه شدند. غلظت نانوذرات درون سیال پایه از رابطه (۸) مشخص می‌شود.

$$m_p = \frac{\phi}{1-\phi} \rho_p v \quad (8)$$



شکل ۲ الگوریتم طراحی سیستم فازی مبتنی بر جدول ارجاع

که در آن m_p وزن مورد نیاز از نانوذرات در تهیه نانوسیالات با غلظت ϕ که به صورت درصد حجمی است. ρ_p چگالی نانوذرات و v حجم سیال کاری یا نانوسیال می‌باشد. از آنجا که به ۵۰۰ ml از سیال کاری در هر آزمایش نیاز است، در هر مرحله ۵۰۰ ml نانوسیال آماده می‌شود. برای ایجاد سوسپانسیون همگن و پایدار، نانوذرات در چندین

$$\begin{cases} x^{\min} = \min_i x_i \\ x^{\max} = \max_i x_i \end{cases} \Rightarrow x_i \in [x^{\min}, x^{\max}], X = [x^{\min}, x^{\max}] \quad (2)$$

$$\begin{cases} y^{\min} = \min_i y_i \\ y^{\max} = \max_i y_i \end{cases} \Rightarrow y_i \in [y^{\min}, y^{\max}], Y = [y^{\min}, y^{\max}]$$

فضای ورودی و خروجی، بین مقادیر حداقل و حداکثر آنها طبقه بندی می‌شود. در واقع محدودهای مشخص شده در رابطه (۲) با استفاده از مجموعه‌های فازی به طور کامل تقسیم بندی می‌شوند. در رابطه (۳) توابع عضویت^۲ ورودی و خروجی با A و B نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} X &\Rightarrow \mu_{A1}, \mu_{A2}, \dots, \mu_{Amx} \\ Y &\Rightarrow \mu_{B1}, \mu_{B2}, \dots, \mu_{Bmy} \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن X و Y به ترتیب مجموعه اعداد ورودی و خروجی و m_x و m_y به ترتیب تعداد توابع عضویت ورودی و خروجی می‌باشند.

هدف ایجاد یک نگاشت از فضای X به Y ($f: X \rightarrow Y$) می‌باشد که رفتار داده‌های آزمایشگاهی را تقلید کند. در واقع نگاشت f باید طوری طراحی شود که کمترین فاصله ممکن را از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی داشته باشد. این نگاشت از طریق قواعد "اگر-آنکه" فازی^۳ انجام می‌شود. در زیر برای نمونه قاعده r برای داده A_m نشان داده شده است:

$$\text{Rule } r: \text{ if } x_i \text{ is } A_j \text{ then } y_i \text{ is } B_k \quad (4)$$

که در آن زیرنویس‌های z و k شماره تابع عضویت ورودی و خروجی می‌باشد. تعداد کل قواعد که می‌توان برای این سیستم فازی ایجاد کرد به تعداد همه ترکیبات ممکن بین ورودی و خروجی است:

$$N_R = m_x \times m_y \quad (5)$$

که در آن N_R تعداد کل قواعد است. از آنجا که عواملی چون انواع خطا و یا عوامل ناشناخته در فرآیند تاثیر دارند، ممکن است به ازای ورودی یکسان خروجی متفاوت وجود داشته باشد. به همین علت، باید میزان صحت و یا ارزش هر قاعده را مشخص کرد و قواعد ضعیفتر را از سیستم فازی حذف نمود. برای اینکار از استدلال تقریبی^۴ که به آن استدلال فازی نیز گفته می‌شود استفاده می‌شود. طی استدلال تقریبی یک نتیجه خاص از مجموعه‌ای از قواعد فازی مشتق می‌شود. با توجه به سادگی و مناسب بودن مدل استنتاج مددانی برای داده‌های کیفی [۴۵]، از این استلزام جهت تعیین ارزش قواعد استفاده شده است. رابطه مربوط به ارزش هر قاعده به صورت رابطه ۶ می‌باشد.

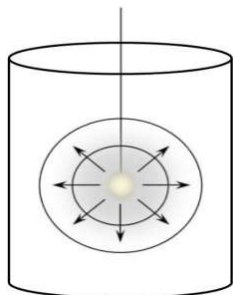
$$S_r(x_i, y_i) = \mu_{A_j}(x_i) \times \mu_{B_k}(y_i) \quad (6)$$

که در آن S_r ارزش قاعده r برای داده z می‌باشد. در واقع همه داده‌ها در این رابطه قرار می‌گیرند و امتیاز قاعده r به صورت

^۲ Membership function (MF)

^۳ Fuzzy "if-then" rules

^۴ Approximate reasoning



شکل ۴- طرحواره نفوذ اسید بنزوئیک به توده سیال

از پارامترهای مهم در اندازه گیری ضریب نفوذ می توان به شعاع اولیه گلوله اسید بنزوئیک (۴ mm)، وزن اولیه گلوله و وزن آن پس از انجام آزمایش و زمان هر آزمایش (حدود ۷۰ min)، غلظت تعادلی اسید بنزوئیک در شرایط آزمایش (24 mol/m^3) اشاره کرد. در انجام آزمایش ها فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- انتقال جرم فقط در اثر نفوذ مولکولی انجام می پذیرد.
- نفوذ به صورت شعاعی است.
- خواص فیزیکی ثابت در نظر گرفته می شود.
- دمای سیال کاری در همه نقاط یکسان است (20°C).
- شعاع کره اسید بنزوئیک در طول آزمایش ثابت می ماند (کمتر از ۰/۷۵٪ تغییر می کند).

۶- نانوذرات بطور یکنواخت درون سیال پایه پراکنده شده اند. جهت انجام آزمایش ها در ابتدا کره ای از جنس اسید بنزوئیک با شعاع ۴ mm ساخته می شود. و سپس درون ظرف آزمایش با شعاع ۴۵ mm قرار می گیرد. پس از گذشت زمان ۷۰ min گلوله اسید بنزوئیک از ظرف آزمایش خارج می شود. پس از آن سیال کاری را با استفاده از همزن مکانیکی کاملاً همگن کرده و با استفاده از تست UV-Vis (Cary 8454, American) غلظت اسید حل شده درون سیال کاری تعیین می شود. از روی غلظت اسید مقدار جرم انتقال یافته کره اسیدی به دست می آید. همچنین از ترازوی دیجیتال^۶ (KERN PLS-360-3, Germany) برای وزن کردن کره اسید بنزوئیک قبل و بعد آزمایش نفوذ استفاده شد. این کار برای مقایسه با نتایج تست UV و بررسی میزان جذب سیال کاری و نانوذرات بر سطح گلوله اسیدی انجام شده است. بیشترین میزان اختلاف حدود ۲۲٪ بود که در محدوده عدم قطعیت موجود در آزمایش ها است. تمامی آزمایش ها در دمای ثابت 20°C انجام می شود. از آنجا که در هر آزمایش از سیال و نانوسیال تازه استفاده می شود، غلظت اسید بنزوئیک در توده آن ها معادل با صفر در نظر گرفته می شود.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- بخش آزمایشگاهی

برای تعیین صحت کار دستگاه آزمایشگاهی، نتایج حاصل از آزمایش برای تعیین ضریب نفوذ اسید بنزوئیک در آب با رابطه تجربی موجود در مرجع [۴۶] و مقدار گزارش شده در مرجع [۴۷] مقایسه

مرحله به سیال پایه اضافه شدند. در هر مرحله از اضافه کردن نانوذرات، سوسپانسیون به مدت ۲۲ دقیقه در مجاورت یک لرزاننده مافوق صوت^۵ (Pars Nahand, Iran) قرار گرفت و بعد از آن به وسیله یک همزن مجهز به مگنت (RH.Basic2-IKAMAG, Germany) به مدت ۲۲ دقیقه همزده شد. به طور کلی نانوسیالات به مدت ۸ ساعت درون دستگاه تولید کننده امواج مافوق صوت قرار گرفته و به مدت ۲۴ ساعت به وسیله همزن مخلوط شدند. در پایان هر آزمایش هیچ گونه ته نشینی درون ظرف آزمایش مشاهده نشد. دانسیته نانوذرات سیلیکا استفاده شده در آزمایش ها معادل $2/4 \text{ g/cm}^3$ می باشد. در شکل ۳ پایداری نانوسیال ۰/۸٪ حجمی (غلظت غلظت نانوذرات در سیال پایه) نشان داده شده است. پس از گذشت ۱۰ روز ناحیه ای شفاف در بالای سطح نانوسیال، نشان دهنده ته نشینی نانوذرات در آن می باشد.



شکل ۳- پایداری نانوسیال آب-سیلیکای ۰/۸٪ حجمی در زمان های مختلف. الف) لحظه ساخت. ب) ۱۰ روز بعد. پ) ۲۵ روز بعد

دستگاه آزمایش و روش انجام آزمایش ها به تفصیل در کار قبلی توضیح داده شده است [۲۵]. در کار قبل با استفاده از یک روش بسیار ساده و ارزان ضریب نفوذ اسید بنزوئیک در نانوسیالات آب-اکسید آلومینیوم در دمای ثابت اندازه گیری شده بود. در کار حاضر جهت بررسی اثر نوع نانوذرات از نظر جنس، خصوصیات فیزیکی، پایداری و اندازه، آزمایش های کار قبلی با نانوسیالات آب-سیلیکا انجام شده است و همچنین با استفاده از مدلسازی فازی، فرآیند نفوذ جرم در نانوسیالات مدلسازی و شبیه سازی شده است.

در آزمایش ها ضریب نفوذ گلوله اسید بنزوئیک درون نانوسیالات حاوی نانوذرات آبریز سیلیکا اندازه گیری شده است. شکل ۴ دستگاه آزمایش را به صورت طرحواره نشان می دهد. کره اسید بنزوئیک در مرکز سیال کاری درون ظرف آزمایش به شعاع ۴۵ mm قرار می گیرد. دستگاه آزمایشگاهی که به تفصیل در کار قبل تشریح شده است [۳۵] جهت اندازه گیری ضریب نفوذ گلوله اسید بنزوئیک در نانوسیالات حاوی نانوذرات آبریز سیلیکا شامل: کنترلر دما جهت تنظیم دما، گیره برای جلوگیری از ایجاد لرزش در ظرف آزمایش درون حمام آب، ظرف آزمایش که سیال کاری در آن قرار می گیرد، حمام آب گرم جهت ایجاد شرایط دما ثابت، سیم رابط و سیم مفتول برای قرار دادن کره اسید بنزوئیک درون سیال می باشد.

⁶ Digital Balance

⁵ Ultrasonic Sonicator

شده است.

در جدول ۳ مقدار ضریب نفوذ اندازه گیری شده برای اسید بنزوئیک در این پژوهش با مقادیر گزارش شده در مراجع [۴۶، ۴۷] درون آب با یکدیگر مقایسه شده اند. میزان انحراف نتایج آزمایش گزارش شده در جدول ۳ می تواند به دلیل کوتاه بودن مدت زمان انتقال جرم و یا کوچک بودن ابعاد ظرف باشد.

جدول ۳- نتایج آزمایش

میزان انحراف نتایج آزمایش (%)	$D_{AB} \times 10^{-9} \text{ (m}^2/\text{s)}$				دما (°C)
از مرجع [۴۶]	مرجع [۴۶]	مرجع [۴۶]	مرجع [۴۷]	پژوهش	۲۰
۲۰/۵٪	۱۵/۶٪	۰/۸۷۳	۰/۹۱	۱/۰۵۲	

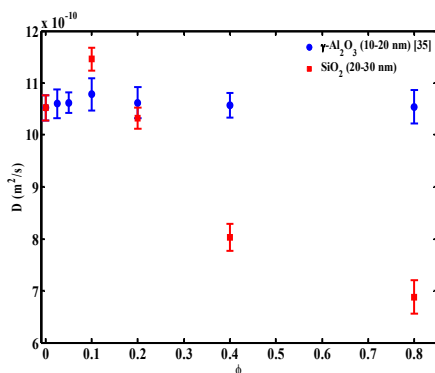
جهت کاهش خطای تصادفی، هر آزمایش سه مرتبه تکرار می شود. آزمایش تعیین ضریب نفوذ در نانوسیالات با نسبت های حجمی مختلف از نانوذرات به صورت مشابه تکرار می شود.

نتایج اندازه گیری ضریب نفوذ اسید بنزوئیک در نانوسیالات حاوی نانوذرات سیلیکا در شکل ۵ نشان داده شده است. میله های خطا در شکل ۵، انحراف استاندارد از سه دفعه تکرار آزمایش ها می باشد.

با توجه به شکل ۵، بیشترین مقدار افزایش ضریب نفوذ در نانوسیالات حاوی اکسید آلومینیوم تا ۳٪ نسبت به ضریب نفوذ در آب خالص رخ می دهد [۳۵]. این مقدار افزایش برای ضریب نفوذ در نسبت حجمی ۰/۱٪ از نانوذرات قابل مشاهده است. در ادامه با افزایش غلظت نانوذرات گاما آلومینا دامنه تغییرات ضریب نفوذ کم می شود. ضریب نفوذ اسید بنزوئیک در غلظت های پایین (۰/۱ درصد حجمی) از نانوسیالات آب-سیلیکا نسبت به آن در آب خالص تا ۹٪ افزایش نشان می دهد. در غلظت های بالا از نانوذرات سیلیکا ضریب نفوذ بطور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد، به گونه ای که در نسبت حجمی ۰/۸٪ از نانوذرات سیلیکا، ضریب نفوذ اسید بنزوئیک نسبت به آن در آب خالص تا ۳۵٪ کاهش می یابد. از شکل ۵ می توان نتیجه گرفت که هنوز با قاطعیت نمی توان گفت که نانوذرات چه تاثیری بر ضریب نفوذ خواهند داشت. البته این موضوع در نتایج جدول ۲ نیز نمایان است. عواملی چون نوع نانوذرات، اندازه و غلظت آنها می تواند بر فرآیند نفوذ جرم موثر باشد. احتمالاً نوع فرآیند نفوذ، فاز جزء نفوذ کننده و شرایط آزمایش تعیین ضریب نفوذ، بر مقادیر آزمایش تاثیر گذار باشد. با توجه به جدول ۲، آزمایش هایی که مربوط به خود نفوذی آب می باشد [۲۹، ۳۰] کاهش ضریب نفوذ را با نانوذرات نشان می دهند. البته در مرجع [۳۴] نیز به همین روش ضریب نفوذ اندازه گیری شده و اثر مثبت یا منفی از نانوذرات گزارش نشده است. در این مرجع [۳۴] بیشینه غلظت نانوذرات ۱٪ می باشد در حالی که کمینه غلظت نانوذرات در دو مورد اشاره شده ۱٪ [۲۹] و ۳/۸٪ [۳۰] گزارش شده است.

حرکات براونی نانوذرات و متعاقباً میکروجابجایی های اجباری به وجود آمده به عنوان دلیل اصلی افزایش انتقال جرم در نانوسیالات

گزارش شده است [۱۱، ۱۲، ۲۲، ۲۵، ۲۸، ۴۸]. اگر چه برخی از پژوهشگران معتقدند که حرکت براونی نانوذرات و میکروجابجایی حاصل از چرخش آن ها نمی تواند مکانیسم کنترل کننده انتقال جرم در نانوسیالات باشد [۲۹، ۳۳]. همچنین تجمع نانوذرات در غلظت های بالا در نانوسیالات می تواند موجب کاهش شدت انتقال جرم شود [۱۱، ۱۲]. افزایش در پیچیدگی مسیر نفوذ مولکول های ماده حل شونده به دلیل ایستادن نانوذرات در سر راهشان می تواند موجب کاهش در نفوذ جرم شود [۲۹]. مولکول های حلال لایه ای روی سطح نانوذرات تشکیل می دهند و با آنها که سرعت نفوذ کمتری نسبت به مولکول های آزاد حلال دارند حرکت می کنند. این مکانیسم موجب کاهش شدت انتقال جرم می شود [۲۹].



شکل ۵- ضریب نفوذ اسید بنزوئیک در نانوسیالات در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد

۲-۴- بخش مدلسازی فازی

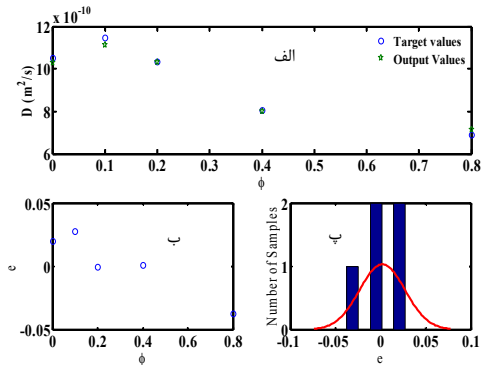
جهت تولید سیستم استنتاج فازی و نگاشت ورودی به خروجی، نیاز به تعرف توابع عضویت مناسب است. منظور از تابع عضویت مناسب از نظر نوع و تعداد می باشد. تابع عضویت، منحنی ای است که هر نقطه از فضای ورودی را به یک مقدار (درجه) عضویت بین صفر و یک نگاشت می کند. در مجموعه های فازی باید انتقال از شمول به عدم شمول به صورت تدریجی انجام شود. این انتقال به کمک توابع عضویت انجام می شود. بنابراین بهتر است از توابعی استفاده شود که قابلیت انتقال نرم و تدریجی را داشته باشند. توابع عضویت گوسی علاوه بر سادگی دارای نرمی هستند و همچنین در تمامی نقاط حوزه تعریف^۸ مجموعه فازی، از مقادیر غیر صفر برخوردارند. برای داده های آزمایشگاهی (نمونه ها)^۹ ۸ تابع عضویت گوسی برای ورودی و ۵ تابع عضویت گوسی برای خروجی در نظر گرفته شده است. در واقع در این تعداد تابع عضویت کمترین خطا و پیچیدگی در مدلسازی فازی وجود دارد. شکل ۶ توابع عضویت ورودی و خروجی را نشان می دهد. به دلیل سادگی، نرمی و دارا بودن مقدار غیر صفر در کلیه نقاط در مدلسازی فازی از تابع عضویت گوسی استفاده شده است. توابع عضویت ورودی و خروجی به ترتیب با A و B نشان داده شده اند. در شکل (۷) ساختمان سیستم استنتاج فازی نشان داده شده است. همانطور که در این شکل

^۸ Support

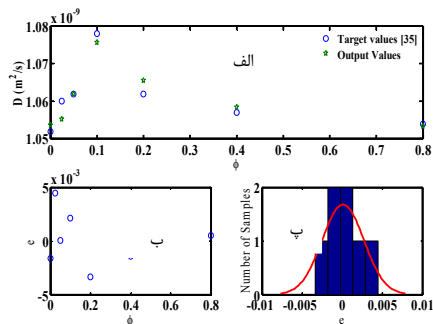
^۹ Samples

^۷ Error Bars

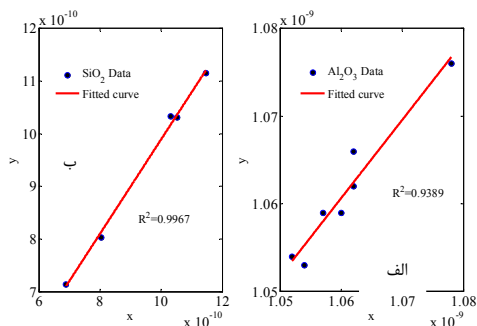
آب/اکسید آلومینیوم (الف) و آب/سیلیکا نشان داده شده است. ضریب همبستگی برای نانوسیالات اکسید آلومینیوم و سیلیکا به ترتیب ۰/۹۳۸۹ و ۰/۹۹۶۷ می‌باشد.



شکل ۸- الف) نتایج مدل فازی و داده‌های آزمایشگاهی نانوسیال سیلیکا. ب) مقادیر خطای نسبی در غلظت‌های مختلف نانوذرات. پ) توزیع خطا



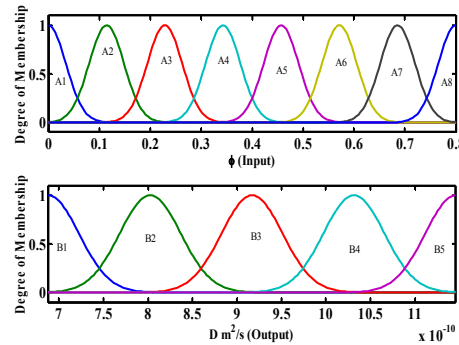
شکل ۹- الف) نتایج مدل فازی و داده‌های آزمایشگاهی نانوسیال اکسید آلومینیوم. ب) مقادیر خطای نسبی در غلظت‌های مختلف نانوذرات. پ) توزیع خطا برای داده‌ها



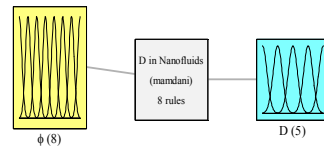
شکل ۱۰- داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل‌سازی فازی برای نانوسیالات الف) آب/گاما آلومینا. ب) آب/سیلیکا

مقادیر مربوط به قدرمطلق متوسط خطای نسبی^{۱۲} و میانگین مربعات خطا^{۱۳} با استفاده از روابط زیر محاسبه شده و برای هر نانوسیال

مشخص است، با توجه به تعداد توابع متغیر ورودی تنها ۸ قاعده از ۴۰ قاعده ایجاد شده معتبر است.



شکل ۶- توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی سیستم فازی طراحی شده



System D in Nanofluids: 1 inputs, 1 outputs, 8 rules

شکل ۷- ساختمان سیستم استنتاج فازی طراحی شده

در شکل ۸ (قسمت الف) مقایسه بین نتایج مدل‌سازی فازی (مقادیر خروجی^{۱۰}) با مقادیر آزمایشگاهی (مقادیر هدف^{۱۱}) برای نانوسیال حاوی نانوذرات سیلیکا نشان داده شده است. جهت مشخص شدن میزان انحراف بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل میزان انحراف بین آنها در قسمت ب شکل ۸ ارائه شده است. رابطه خطای (e) به صورت تفاضل داده‌های آزمایشگاهی از نتایج مدل‌سازی فازی به صورت زیر می‌باشد:

$$e = D_{\text{Experiment}} - D_{\text{Fuzzy Model}} \quad (9)$$

همچنین نمودار میله‌ای خطای نسبی بر اساس فراوانی داده‌ها در قسمت پ شکل ۸ نشان داده شده است. در این قسمت از نمودار یک توزیع گوسی بر داده‌ها منطبق شده است و نشان می‌دهد که میانگین خطای داده‌ها به صفر نزدیک است.

در شکل ۹ نیز نتایج مدل‌سازی برای نانوسیال حاوی نانوذرات اکسید آلومینیوم ارائه شده است. در قسمت پ شکل ۸ و ۹ نمودار فراوانی خطا برای داده به همراه یک توزیع گوسی منطبق شده بر آنها رسم شده است. این بخش از شکل‌ها نشان می‌دهد که میانگین خطاها نزدیک به صفر است. همانطور که از شکل‌های ۸ و ۹ پیداست، سیستم فازی طراحی شده توانسته با وجود نمونه‌های کم، با خطای بسیار کمی فرآیند نفوذ جرم در نانوسیالات را مدل کند. در شکل ۱۰ مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل‌سازی فازی برای نانوسیالات

¹² Absolute Average Relative Error (AARE)

¹³ Mean Square Error (MSE)

¹⁰ Output Values

¹¹ Target Values

- [3] Hojjat M., Etemad S. Gh., Bagheri R. and Thibault J., Turbulent forced convection heat transfer of non-Newtonian nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 35, no. 7, pp.1351-1356, 2011.
- [4] Farajollahi B., S.G. Etemad and Hojjat M., Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 1, pp. 12-17, 2010.
- [5] Asadzadeh F., Esfahany M.N. and Etesami N., Natural convective heat transfer of Fe3O4/ethylene glycol nanofluid in electric field. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 62, pp. 114-119, 2012.
- [6] Mahrood M.R.K., Etemad S.G. and Bagheri R., Free convection heat transfer of non Newtonian nanofluids under constant heat flux condition. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 38, no. 10, pp. 1449-145, 2011.
- [7] Nasiri M., Etemad S.G. and Bagheri R., Experimental heat transfer of nanofluid through an annular duct. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 7, pp. 958-963, 2011.
- [8] Shahmohammadi P. and Beiki H., A numerical investigation of γ -Al2O3-water nanofluids heat transfer and pressure drop in a shell and tube heat exchanger. *Transport Phenomena in Nano and Micro Scales*, Vol. 2, No. 1, pp. 29-35, 2016.
- [9] Khoshvaght-Aliabadi M. and Alizadeh A., An experimental study of Cu-water nanofluid flow inside serpentine tubes with variable straight-section lengths. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 61, pp. 1-11, 2015.
- [10] Khoshvaght-Aliabadi M., Hormozi F. and Zamzamin A., Role of channel shape on performance of plate-fin heat exchangers: Experimental assessment. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 79, pp. 183-193, 2014.
- [11] Beiki H., Nasr Esfahany M. and Etesami N., Laminar forced convective mass transfer of γ -Al2O3/electrolyte nanofluid in a circular tube. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 64, pp. 251-256, 2013.
- [12] Beiki H., Esfahany M. and Etesami N., Turbulent mass transfer of Al2O3 and TiO2 electrolyte nanofluids in circular tube. *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 15, No. 4, pp. 501-508, 2013.
- [13] Rouina S., Abdeh H., Bahmanyar H. and Sade A., Investigating the effect of nanoparticles on the dispersed phase mass transfer coefficient in a rotary disc column. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 104, pp. 84-93, 2016.
- [14] Sara O., Icer F., Yapici S. and Sahin B., Effect of suspended CuO nanoparticles on mass transfer to a rotating disc electrode. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, No. 3, pp. 558-564, 2011.
- [15] Olle B., Bucak S., Holmes T.C., Bromberg L. Hatton T. A. and Wang D.I.C., Enhancement of oxygen mass transfer using functionalized magnetic nanoparticles. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 45, No. 12, pp. 4355-4363, 2006.
- [16] Jung J.-Y., Lee J., and Kang Y., CO2 absorption characteristics of nanoparticle suspensions in methanol. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 8, pp. 2285-2290, 2012.
- [17] Lee J.W., Torres-Pineda I., Lee J. H. and Kang Y. T., Combined CO2 absorption/regeneration performance enhancement by using nanoabsorbents. *Applied Energy*, Vol. 178, pp. 164-176, 2016.

در جدول ۴ ارائه شده است.

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{D_i^{Experiment} - D_i^{FuzzyModel}}{D_i^{Experiment}} \right| \quad (10)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i^{Experiment} - D_i^{FuzzyModel})^2 \quad (11)$$

از جدول ۴ نتیجه می‌شود که افزایش تعداد قواعد و به تبع آن افزودن به پیچیدگی سیستم فازی نمی‌تواند دقت مدل‌سازی را افزایش دهد.

جدول ۴- تغییرات درصد خطا با تعداد قواعد

تعداد کل قواعد	تعداد قواعد نهایی	نانوسیال حاوی اکسید آلومینیوم		نانوسیال حاوی سیلیکا	
		AARE (%)	MSE (%)	AARE (%)	MSE (%)
۴۰	۸	۰/۱۹	$۶/۵۳ \times 10^{-22}$	$۱/۷۲ \times 10^{-1}$	$۴/۱۸ \times 10^{-20}$
۹۰	۱۰	۰/۲۲	$۹/۱۵ \times 10^{-22}$	۱/۰۹	$۱/۸۳ \times 10^{-20}$
۱۴۰	۱۴	۰/۲۲	$۱/۰۱ \times 10^{-21}$	۱/۲۶	$۱/۳۶ \times 10^{-20}$
۲۲۴	۱۶	$۶/۶۴ \times 10^{-2}$	$۹/۹۸ \times 10^{-22}$	۰/۹۴	$۷/۷۸ \times 10^{-21}$

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه توانایی یک سیستم استنتاج فازی مبتنی بر جدول رجوع جهت مدل کردن و پیشگویی فرآیند نفوذ جرم اسید بنزوئیک در نانوسیالات حاوی نانوذرات سیلیکا و اکسید آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از یک روش ساده و ارزان ضریب نفوذ اسید بنزوئیک در نانوسیالات سیلیکایی اندازه گیری شد. برای ارزیابی مدل فازی پیشنهادی، نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر موجود در مرجع [۳۵] مقایسه شد. سیستم فازی با ۸ قاعده توانست به خوبی و با انحراف کم فرآیند نفوذ جرم در نانوسیالات تقلید کند. بیشینه قدر مطلق متوسط خطای نسبی و متوسط مربعات خطا با تغییر تعداد قواعد، به ترتیب $۴/۱۷۷ \times 10^{-20}$ و ۱/۲۶ می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها در غلظتهای پایین نانوذرات آبرگیز سیلیکا (زیر ۰/۲٪ حجمی) هیچ گونه تغییر قابل ملاحظه ای در ضریب نفوذ اسید بنزوئیک در نانوسیالات نسبت به آن در سیال پایه مشاهده نگردید. اگرچه با افزایش در غلظت نانوذرات سیلیکا ضریب نفوذ شدیداً کاهش پیدا کرد. در غلظت ۰/۸٪ از نانوذرات آبرگیز سیلیکا ضریب نفوذ به ۰/۶۵٪ مقدار آن در سیال پایه رسید. با توجه به نتایج آزمایشگاهی حاصله، روش اندازه گیری ضریب نفوذ، محدوده غلظتی نانوذرات و نوع آنها می‌تواند شدیداً نفوذ جرم در نانوسیالات را تحت تاثیر قرار دهد.

۶- منابع

- [1] Pang C., Lee J.W. and Kang Y.T., Review on combined heat and mass transfer characteristics in nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 87, pp. 49-67, 2015.
- [2] Hojjat M., Etemad S. Gh., Bagheri R. and Thibault J., Convective heat transfer of non-Newtonian nanofluids through a uniformly heated circular tube. *International*

- diffusion coefficient and tracer diffusion coefficient of tert-butanol in water-based silica nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 86, pp. 166-174, 2014.
- [۳۵] فرد م.م. و بیکی ح.، اندازه گیری ضریب نفوذ بنزوتیک اسید در نانوسیال آب-گاما آلومینا در دمای ثابت. *مجله شیمی و مهندسی شیمی ایران*، سال ۳۴، شماره ۱، صفحه ۳۱، ۱۳۹۴.
- [۳۶] بیکی ح.، دادور م. و حلاج ر.، مدلسازی و شبیه سازی کاتالیست تولید دی متیل اتر به روش مدل‌های شبکه ای در دو بعد. *مجله شیمی و مهندسی شیمی ایران*، سال ۲۷، شماره ۴، ۱۳۸۷.
- [37] Bahiraei M., Hosseinalipour S. M., Zabihi K. and Taheran E., Using neural network for determination of viscosity in water-TiO2 nanofluid. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 4, pp. 74268, 2012.
- [38] Esfè M.H., Saedodin S., Bahiraei M., Toghraie D., Mahian O. and Wongwises S., Thermal conductivity modeling of MgO/EG nanofluids using experimental data and artificial neural network. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 118, No. 1, pp. 287-294, 2014.
- [39] Esfè M.H., Saedodin S., Sina N., Afrand M. and Rostami S., Designing an artificial neural network to predict thermal conductivity and dynamic viscosity of ferromagnetic nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 68, pp. 50-57, 2015.
- [40] Hojjat M., Etemad S. Gh., Bagheri R. and Thibault J., Thermal conductivity of non-Newtonian nanofluids: experimental data and modeling using neural network. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no.5, pp. 1017-1023, 2011.
- [41] Yousefi F., Karimi H. and Mohammadiyan S., Viscosity of carbon nanotube suspension using artificial neural networks with principal component analysis. *Heat and Mass Transfer*, pp. 1-11, 2015.
- [42] Yousefi F., Karimi H. and Papari M.M., Modeling viscosity of nanofluids using diffusional neural networks. *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 175, pp. 85-90, 2012.
- [43] Hussein A.M., Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System of friction factor and heat transfer nanofluid turbulent flow in a heated tube. *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 8, pp. 94-104, 2016.
- [44] Salehi H., Zeinali-Heris S., Esfandiary M. and Koolivand M., Nero-fuzzy modeling of the convection heat transfer coefficient for the nanofluid. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 4, pp. 575-583, 2013.
- [45] Rahmanian B., Pakizeh M., Esfandiary M., Heshmatnezhad F. and Maskooki A., Fuzzy modeling and simulation for lead removal using micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF). *Journal of hazardous materials*, Vol. 192, No. 2, pp. 585-592, 2011.
- [46] Lozar J., Laguerie C. and Couderc J.P., Diffusivité de l'acide benzoïque dans l'eau: Influence de la température. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 53, No. 2, pp. 200-203, 1975.
- [47] Delgado J.M.P.Q., Molecular Diffusion Coefficients of Organic Compounds in Water at Different Temperatures. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, Vol. 28, No. 5, pp. 427-432, 2007.
- Ashrafmansouri S.S., Willersinn S., Nasr Esfahany M. and Bart H. J., Influence of Silica Nanoparticles on Mass Diffusion in a Membrane-Based Microcontactor. *Chemie Ingenieur Technik*, Vol. 87, No. 8, pp. 1054-1054, 2015.
- [18] Park S.-W., Choi B. S., Kim S. S., Lee B. D. and Lee J. W., Absorption of carbon dioxide into aqueous colloidal silica solution with diisopropanolamine. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 14, No. 2, pp. 166-174, 2008.
- [19] Wen J.P., Jia X.Q. and Feng W., Hydrodynamic and Mass Transfer of Gas-Liquid-Solid Three-Phase Internal Loop Airlift Reactors with Nanometer Solid Particles. *Chemical engineering & technology*, Vol. 28, No. 1, pp. 53-60, 2005.
- [20] Feng W., Wen J., Fan J., Yuan Q., Jia X. and Sun Y., Local hydrodynamics of gas-liquid-nanoparticles three-phase fluidization. *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No. 24, pp. 6887-6898, 2005.
- [21] Beiki H., Esfahany M.N. and Etesami N., Laminar Forced Convective Mass Transfer of Nanofluids in a circular Tube. *ICHMT DIGITAL LIBRARY ONLINE*, 2011.
- [22] Keshishian N., Esfahany M.N. and Etesami N., Experimental investigation of mass transfer of active ions in silica nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 148-153, 2013.
- [23] Rahmatmand B., Keshavarz P. and Ayatollahi S., Study of Absorption Enhancement of CO2 by SiO2, Al2O3, CNT, and Fe3O4 Nanoparticles in Water and Amine Solutions. *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol. 61, No. 4, pp. 1378-1387, 2016.
- [24] Esmaeili Faraj S. H., Nasr Esfahany M., Jafari-Asl M. and Etesami N., Hydrogen Sulfide Bubble Absorption Enhancement in Water-Based Nanofluids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 53, No. 43, pp. 16851-16858, 2014.
- [25] Ashrafmansouri S. S., Willersinn S., Nasr Esfahany M. and Bart H. J., Influence of Silica Nanoparticles on Mass Transfer in a Membrane-based Micro-Contactor. *RSC Advances*, 2016.
- [26] Krishnamurthy S., Bhattacharya P., Phelan P.E. and Prasher R. S., Enhanced mass transport in nanofluids. *Nano Letters*, Vol. 6, No. 3, pp. 419-423, 2006.
- [27] Fang, X., Y. Xuan, and Q. Li, Experimental investigation on enhanced mass transfer in nanofluids. *Applied physics letters*, vol. 95, no. 20, pp. 203108, 2009.
- [28] Veilleux J. and Coulombe S., A total internal reflection fluorescence microscopy study of mass diffusion enhancement in water-based alumina nanofluids. *Journal of Applied Physics*, Vol. 108, No. 10, 2010.
- [29] Gerardi C., Cory D., Buongiorno J., Hu L.W. and McKrell T., Nuclear magnetic resonance-based study of ordered layering on the surface of alumina nanoparticles in water. *Applied Physics Letters*, Vol. 95, No. 25, pp. 253104, 2009.
- [30] Turanov A.N. and Tolmachev Y.V., Heat- and mass-transport in aqueous silica nanofluids. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 12, pp. 1583-1588, 2009.
- [31] Ozturk S., Hassan Y.A. and Ugaz V.M., Interfacial Complexation Explains Anomalous Diffusion in Nanofluids. *Nano Letters*, Vol. 10, No. 2, pp. 665-671, 2010.
- [32] Subba-Rao V., Hoffmann P.M. and Mukhopadhyay A., Tracer diffusion in nanofluids measured by fluorescence correlation spectroscopy. *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 13, No. 12, pp. 6313-6319, 2011.
- [33] Feng X. and Johnson D.W., Mass transfer in SiO2 nanofluids: A case against purported nanoparticle convection effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 13-14, pp. 3447-3453, 2012.
- [34] Ashrafmansouri S. S., Nasr Esfahany M., Azimi Gh. and Etesami N., Experimental investigation of water self-