

# مدل‌سازی فرآیند تبخیر ناگهانی با استفاده از روش فازی ممدانی و مفهومی جدید به نام ترکیب درصد فازی

محمدحسین اقبال احمدی، سیدجاوید روئیایی\* و شکوفه طیبی

پژوهشکده توسعه فناوری‌های پالایش و فرآورش نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۶ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۷

## چکیده

در این مقاله روشی جدید برای مدل‌سازی به کمک منطق فازی با دیدگاه ممدانی معرفی می‌شود که در آن از مفهومی نوین به نام ترکیب درصد فازی استفاده شده است. متغیر ترکیب درصد فازی تلاش می‌کند متغیرهای ترکیب درصد فرآیند را ادغام و تحت یک متغیر ارائه نماید. بدین ترتیب، یکی از مشکلات روش ممدانی که تعداد قوانین بالای آن می‌باشد، تا حد زیادی برای برخی سیستم‌ها مرتفع می‌شود. به کمک روش پیشنهادی می‌توان بسیاری از فرآیندهای پیچیده با تعداد متغیر زیاد که متغیر ترکیب درصد در بین آنها دیده می‌شود را با دقت مناسبی مدل کرد، بدون اینکه وارد پیچیدگی‌های حل انواع گوناگون معادلات ریاضی و محاسبه پارامترهای مختلف شد. برای نشان دادن قابلیت‌های روش، آن را برای مدل‌سازی فازی تبخیر ناگهانی یک برش نفتی استفاده کرده و نشان داده شده که می‌توان با دقت بالای ۸۵٪ و با تعداد قوانین کاهش یافته، خروجی‌های مدل در نظر گرفته شده را بدون انجام بهینه‌سازی پیش‌بینی کرد.

**کلمات کلیدی:** مدل‌سازی فازی ممدانی، تبخیر ناگهانی (جداسازی تعادلی) نفت خام، ترکیب درصد فازی، قوانین فازی، منطق فازی

## مقدمه

مربوط به خواص ترموفیزیکی از جمله معادلات حالت و ... می‌باشند، نیاز به دانش دقیق از فرآیند مورد نظر دارند و در مورد سیستم‌های پیچیده غیرخطی و یا سیستم‌های دارای پارامترهای نامعلوم با مشکل مواجه می‌شوند و در برخی موارد انجام ساده‌سازی‌های مختلف اجتناب‌ناپذیر است [۲].

به‌طور کلی سه روش برای مدل‌سازی فرآیندها وجود دارد [۱] که عبارتند از، (۱) روش‌های جعبه سفید<sup>۱</sup> یا مکانیزمی<sup>۲</sup>، (۲) روش‌های جعبه سیاه<sup>۳</sup> و (۳) روش‌های جعبه خاکستری<sup>۴</sup>. روش‌های دسته اول که بر مبنای معادلات حاکم بر پدیده‌های سیستم (به‌عنوان نمونه معادلات انتقال، معادلات

1. White-box  
2. Mechanistic  
3. Black-box  
4. Gray-box

قابل توجه در مورد این روش آن است که در صورت موجود بودن تعداد مناسب داده‌های فرآیندی، به کمک روش‌های ترکیبی بهینه‌سازی [۷]، می‌توان دقت پیش‌بینی مدل فازی ممدانی را تا حد خوبی بالا برد. از جمله تحقیقاتی که در زمینه استفاده از روش فازی ممدانی در توسعه مدل‌های فرآیندها در مقالات سال‌های اخیر دیده می‌شود، می‌توان به مدل‌سازی فرآیند تقطیر واکنشی [۸]، مدل‌سازی شبکه مبدل‌های هم‌سو [۹]، مدل‌سازی راکتور دارویی [۱۰] و تخمین پارامترها در فرآیند تزریق گاز [۱۱] اشاره کرد. علی‌رغم قابلیت‌های بیان شده برای روش فازی ممدانی، یکی از مهم‌ترین مشکلات آن، تعداد قوانین زیاد مورد نیاز جهت سیستم استنباط فازی<sup>۵</sup> آن در مواجهه با سیستم‌های دارای تعداد متغیر بالا است. قوانین فازی<sup>۶</sup> اصلی‌ترین جزء یک مدل فازی ممدانی می‌باشند، که به صورت گزاره‌های "اگر-آنگاه" نوشته شده و بیانگر رفتار فرآیند در حال مطالعه‌اند. در یک مدل فازی ممدانی با افزایش تعداد متغیرهای ورودی مدل، قوانین به‌طور تصاعدی بالا می‌روند و ممکن است به تعداد زیادی قانون منجر شده به‌طوری که مدیریت قوانین و ارائه مدل مقدر نگردد.

در این مقاله، روشی جدید پیشنهاد شده است که دارای قابلیت‌های ویژه مختلفی است، که مهم‌ترین آنها ارائه راهکاری برای کاهش چشمگیر قوانین مدل می‌باشد. به همین منظور متغیر فازی جدیدی معرفی می‌شود که تحت عنوان ترکیب درصد فازی یا FCV<sup>۷</sup> شناخته خواهد شد، به‌طوری که ویژگی‌های منحصر به فردش نه تنها باعث کاهش چشمگیر تعداد قوانین شده، بلکه تحلیل مدل فازی را نیز ساده‌تر می‌کند.

در مقابل روش‌های مکانیزمی، روش‌های جعبه سیاه و جعبه خاکستری مطرح هستند که از جمله کاراترین آنها روش‌های مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی<sup>۱</sup> و روش‌های مبتنی بر منطق فازی<sup>۲</sup> هستند، که می‌توان آنها را به‌عنوان روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نیز طبقه‌بندی کرد [۳]. وجه مشترک این روش‌ها آن است که برای توسعه مدل فرآیند بر مبنای آنها، نیازی به دانستن جزئیات پدیده‌های حاکم بر سیستم و معادلات کمی مربوط به آنها نیست و دغدغه مواجه شدن با پیچیدگی‌های روش‌های حل عددی مبتنی بر حدس و خطا و یا تحلیلی مربوط به حالت‌های بسیار ساده شده و دور از واقعیت (به‌دلیل فرض‌های ساده‌کننده مختلف مورد نیاز جهت تبدیل معادلات مدل مکانیزمی فرآیند به‌شکلی که به‌صورت تحلیلی قابل حل باشد) برطرف می‌شود. روش‌های مبتنی بر منطق فازی خود شامل دو دسته دیدگاه سوگنو<sup>۳</sup> [۴] و دیدگاه ممدانی<sup>۴</sup> [۵] می‌باشند.

اگر برای مدل‌سازی یک فرآیند از روش شبکه عصبی مصنوعی و روش فازی سوگنو استفاده شود، برای توسعه مدل نیاز به داده کافی وجود دارد. به همین دلیل، علی‌رغم قابلیت‌های این دو روش، در مواردی که داده‌ها به اندازه کافی در اختیار نیست، توسعه این مدل‌ها با مشکل مواجه می‌شود. بر خلاف روش‌های بیان شده، روش فازی ممدانی از قابلیت‌های ویژه‌ای برخوردار است. در این روش، برای توسعه مدل هیچ نیازی به داده‌های فرآیند نیست و برای ارائه مدل تنها نیاز به دانش کیفی و شهودی مربوط به فرآیند مورد نظر است، به‌طوری که این دانش در ساختار مدل به کمک اصول منطق فازی پیاده‌سازی می‌شود. تفسیرپذیری مدل نهایی و قابل فهم بودن آن نیز از ویژگی‌های دیدگاه ممدانی است که در روش شبکه عصبی مصنوعی و روش سوگنو دیده نمی‌شود [۶]. نکته

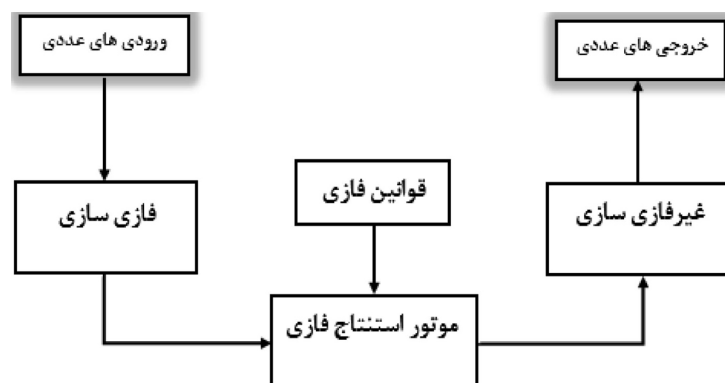
1. Artificial Neural Network (ANN)
2. Fuzzy Logic
3. Sugeno
4. Mamdani
5. Fuzzy Inference System
6. Fuzzy Rules
7. Fuzzy Composition Variable

مدل توسعه داده شده، زمان مربوط به محاسبات تبخیر ناگهانی به‌خصوص در بسیاری از فرآیندها که نیاز به انجام مراحل متوالی محاسبات تبخیر ناگهانی می‌باشد، به‌طور چشمگیری کاهش خواهد یافت، که این امر به دلیل محاسبات ریاضی ساده و سریع مدل فازی توسعه داده شده است.

### روش فازی ممدانی

مراحل اصلی استفاده از روش فازی ممدانی (شکل ۱) شامل مشخص کردن متغیرهای ورودی<sup>۱</sup> با توجه به متغیرهای هدف یا خروجی<sup>۲</sup> فرآیند، فازی کردن متغیرها<sup>۳</sup>، نوشتن قوانین اگر-آنگاه حاکم بر مدل و غیرفازی‌سازی<sup>۴</sup> است [۱۲]. در مرحله فازی‌سازی، ورودی قطعی و عددی<sup>۵</sup> به ورودی فازی تبدیل می‌گردد تا بتواند در سیستم استنتاج فازی مورد استفاده قرار گیرد. در این مرحله، تعدادی محدود توابع عضویت برای متغیرها به منظور تعریف کردن کیفی آنها در چند سطح مختلف (مانند حالت سه سطحی کم، متوسط و زیاد)، با توجه به ماهیت، دقت مورد نظر و میزان حساسیت تغییرات آنها، در نظر گرفته می‌شود.

علاوه بر آن، در روش پیشنهادی فازی نشان داده خواهد شد که، می‌توان بدون نیاز به وارد شدن در پیچیدگی‌های مربوط به حل معادلات ریاضی (به‌هنگام استفاده از روش مدل‌سازی جعبه سفید) یا نیاز مبرم به داده‌ها (به‌هنگام استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و یا روش فازی سوگنو) با دقت قابل قبولی رفتار سیستم را پیش‌بینی کرد. برای نشان دادن قابلیت‌های روش پیشنهادی، آن را بر روی مطالعه موردی مدل‌سازی فازی تبخیر ناگهانی یک برش نفتی که بالقوه دارای متغیرهای زیادی است، پیاده‌سازی و مدلی فازی با تعداد قوانین کم ارائه خواهد شد. هم‌چنین نشان داده خواهد شد که چگونه می‌توان از این روش برای مدل‌سازی فازی چنین فرآیندی که از مشکلاتی مانند دغدغه انتخاب معادله ترمودینامیکی مناسب و محاسبه پارامترهای معادله حالت رنج می‌برد، بهره برد. روش پیشنهادی در مورد خوراک‌هایی که دارای موادی است که محاسبه خواص تعادلی آنها پیچیده و یا با خطای بالا است، تنها با دانستن دانش شهودی نسبت به رفتار فراریت مواد، قابل استفاده و پیاده‌سازی است. هم‌چنین به کمک



شکل ۱ مراحل اصلی روش فازی ممدانی

1. Input Variables
2. Output Variables
3. Fuzzification
4. Defuzzification
5. Crisp
6. Center of Gravity
7. Center of Area

حل نوین، با معرفی متغیری به نام "ترکیب درصد فازی-FCV" جهت ادغام متغیرهای ترکیب درصد (جرمی / مولی / حجمی) موجود در مدل به طریقی فازی، که در ادامه مطرح می‌گردد، انجام می‌شود. این روش در بسیاری از مدل‌های مربوط به فرآیندها که ترکیب درصد مواد در بین متغیرهای سیستم دیده می‌شود، قابل استفاده و پیاده‌سازی است.

### متغیر ترکیب درصد فازی - FCV

هنگام توسعه یک مدل فازی، هر متغیر توسط مجموعه‌های فازی در چند سطح کیفی تعریف می‌شود. به عنوان مثال، فشار می‌تواند توسط سطوح کم، متوسط و زیاد تعریف گردد. به این ترتیب، مقدار کمی فشار پس از مرحله غیرفازی‌سازی و با توجه به درجه تعلق<sup>۱</sup> هر یک از مجموعه‌های فازی به دست می‌آید. به طور مشابه، چنین نوع تعریفی برای متغیر ترکیب درصد یک مخلوط شامل به عنوان مثال ۳ ماده A، B و C نیز به این صورت خواهد بود که برای ترکیب درصد هر یک، سه سطح تعریف شود و بدین ترتیب طبق رابطه ۲، بایستی ۲۷ قانون برای پوشش دادن همه حالات کیفی ترکیب درصدهای مواد گفته شده تعریف کرد. با الهام‌گیری از خاصیت ویژه ترکیب درصد مواد (در مقایسه با سایر انواع متغیرها مانند فشار، دما و ...) که به موجب آن، جمع ترکیب درصد یک مخلوط ۱ می‌شود، می‌توان متغیر فازی جدیدی تحت عنوان FCV تعریف کرد به طوری که در آن، هر مجموعه فازی نماینده ترکیب درصد یک (یا چند ماده) از مخلوط باشد. درجه تعلق هر یک از این مجموعه‌های فازی به نوعی نمایانگر مقدار حضور آن ماده و به نوعی می‌تواند همان ترکیب درصد ماده مورد نظر در مخلوط باشد. حداکثر تعداد این مجموعه‌های فازی، تعداد مواد موجود در مخلوط خواهد بود.

در مرحله تعریف قوانین اگر-آنگاه، ترکیب‌های مختلف حالات متغیرهای ورودی سیستم به جهت دستیابی به حالات کیفی متغیرهای خروجی سیستم نوشته می‌شود. به عنوان مثال، برای یک فرآیند شامل دو ورودی A و B و یک متغیر خروجی C، به طوری که برای هر یک سه سطح کیفی کم، متوسط و زیاد تعریف شده باشد، یک قانون به صورت زیر می‌تواند باشد:

"If A is 'Low' and B is 'High', then C is 'Medium'" (۱)

در صورت نیاز به مقادیر عددی متغیرهای خروجی، در مرحله پایانی از روش‌های مختلف غیرفازی‌سازی مانند مرکز ثقل<sup>۱</sup>، مرکز سطح<sup>۲</sup> و ... استفاده می‌شود. مهم‌ترین مرحله در بین مراحل، نوشتن قوانین حاکم بر سیستم است. تعداد قوانین یک مدل فازی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R = \prod_{i=1}^n FS_i \quad (2)$$

به طور کلی با افزایش تعداد متغیرهای ورودی و به همین ترتیب تعداد مجموعه‌های فازی در یک مدل، تعداد قوانین به طرز تصاعدی بالا رفته و عملاً باعث بالا رفتن احتمال ایجاد خطا، بالا رفتن حجم محاسبات و سخت شدن کنترل آنها می‌شود، به طوری که ممکن است پیاده‌سازی و استفاده از روش فازی ممدانی را عملاً غیرممکن کند. از طرفی چنین مشکلی می‌تواند تفسیرپذیری یک مدل فازی ممدانی را که یکی از مهم‌ترین برتری‌های آن نسبت به روش‌های دیگر است، زیر سوال ببرد. براساس رابطه ۲، برای کاهش تعداد قوانین یک مدل با تعداد متغیرهای ورودی معلوم، دو راه می‌توان تصور کرد. اولین راه، کاهش تعداد توابع عضویت مجموعه‌های فازی متغیرها است. کاهش تعداد توابع عضویت، باعث کاهش محسوس دقت مدل خواهد شد. راه دوم که در این مقاله پیشنهاد و پرداخته خواهد شد، ادغام فازی بعضی از متغیرهای مدل است، به طوری که ضمن حفظ شدن تقریبی دقت مدل، لطمه‌ای به تفسیرپذیری آن نخورده و در عین حال تحلیل آن نیز ساده‌تر شود. این راه

1. Center of Gravity

2. Center of Area

3. Degree of Membership Function

مخلوط که متناظر با آن یک مجموعه فازی نیز وجود دارد، یک ترکیب درصد کمی حاصل هستند و موادی که دارای درجه تعلق بیشتر باشند، در نهایت دارای ترکیب درصد بیشتری نیز خواهند بود.

#### ادغام کردن مواد- (Lumping)

مشابه آنچه در مورد تعریف برش‌های نفتی برای مشخصه‌سازی آنها انجام می‌شود و مجموعه‌ای از مواد تحت یک برش شناخته می‌شوند، برای FCV نیز قابلیت ادغام موادی که دارای رفتار مشابه هستند، در یک مجموعه فازی وجود دارد. این کار در مورد مخلوط‌ها یا جریان‌هایی که دارای تعداد زیادی مواد هستند، می‌تواند کمک کننده باشد. به کمک روش ادغام مواد یا Lumping، برای یک جریان فازی،  $n$  ماده به  $m$  ماده که برای آن  $m < n$  می‌باشد، طوری ادغام می‌شوند که به موجب آن تعداد مجموعه‌های فازی از  $n$  به  $m$  کاهش می‌یابد. درجه تعلق هر یک از  $m$  مجموعه فازی ادغام شده توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

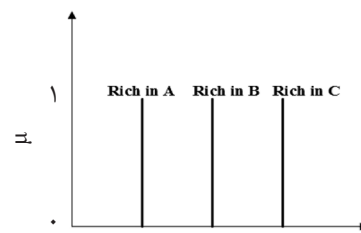
$$\mu_{j-lumped} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i} \quad j = 1 \text{ to } m \quad (5)$$

باید توجه کرد که منطق ادغام کردن مواد بر اساس پدیده و فرآیندی است که به دنبال مدل‌سازی آن هستیم. به‌عنوان مثال، اگر به دنبال مدل‌سازی یک فرآیند تعادلی به منظور محاسبه درصد مولی توزیع شده در فاز بخار و مایع در حال تعادل برای یک خوراک مشخص هستیم، قاعدتاً موادی که دارای نقطه جوش نزدیک به هم هستند، دارای رفتار تعادلی مشابه بوده و می‌توان مجموعه‌ای از آنها را در قالب یک ماده ادغام شده دید.

#### مخلوط شدن جریان‌های فازی

هنگامی که دو یا چند جریان ماده در یک فرآیند با هم مخلوط می‌شوند، میزان ترکیب درصد جریان نهایی متناسب با درصد مولی و دبی مولی هر یک از جریان‌ها است.

هم‌چنین، نام هر یک از این مجموعه‌های فازی برای یک مخلوط به‌عنوان مثال سه جزئی شامل A، B و C به‌صورت "غنی از A (Rich in A)"، "غنی از B (Rich in B)" و "غنی از C (Rich in C)" خواهد بود. نمونه‌ای از یک FCV برای مخلوط گفته شده در شکل ۲ نشان داده شده است. توجه شود که در تعریف FCV، از توابع عضویت Singleton استفاده می‌شود.



شکل ۲ نمونه‌ای از یک FCV برای یک مخلوط سه جزئی

با استفاده از این متغیر، هر جریان یا مخلوط موجود در فرآیند به‌صورت فازی دیده شده و مفهومی تحت عنوان جریان فازی<sup>۱</sup> (یا مخلوط فازی) تعریف خواهد شد. به‌عنوان مثال، برای یک جریان فازی شامل ۲ ماده A و B که تا حد زیادی از A غنی بوده و دارای فشار پایینی نیز می‌باشد، به‌صورت زیر می‌توان خصوصیات فشاری و ترکیب درصدی آن را بیان کرد:

(۳) P is "Low" and the Fuzzy stream is "Rich in A"

#### ویژگی‌های متغیر FCV

##### غیرفازی‌سازی

پس از تعریف متغیر FCV، برای رسیدن به مقدار کمی ترکیب درصد هر یک از مواد، نیاز به مرحله غیرفازی‌سازی می‌باشد. برخلاف روش‌های معمول غیرفازی مانند مرکز سطح، مرحله غیرفازی‌سازی برای این متغیر، بسیار ساده و با کمترین حجم محاسبات انجام می‌شود. برای غیرفازی‌سازی از رابطه زیر باید استفاده شود:

$$z_i = \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^r \mu_i} \quad (4)$$

بدین ترتیب برای هر یک از مواد تعریف شده در

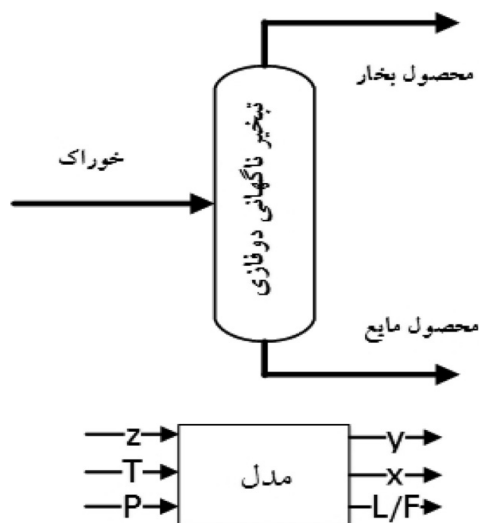
### مثال موردی: مدل‌سازی فرآیند تبخیر ناگهانی نفت خام

به منظور نشان دادن روش فازی مورد نظر برای مدل‌سازی، پیاده‌سازی FCV و ارائه قابلیت‌های آن، در این قسمت فرآیند مشخصی که فرآیند جداسازی تعادلی یا تبخیر ناگهانی نفت خام است، به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است که ماهیت آن به‌صورتی است که در آن تعداد مواد زیاد بوده و عملاً استفاده از روش فازی ممدانی برای مدل‌سازی آن با مشکل مواجه می‌شود. نشان داده خواهد شد، که استفاده از این مفهوم جدید، به مقدار چشمگیری تعداد قوانین مدل را کم کرده و در نهایت می‌توان از قابلیت‌های روش فازی ممدانی برای مدل‌سازی این فرآیند بهره برد. هم‌چنین مدل به‌دست آمده تنها به کمک دانش شهودی فرآیند مورد نظر ساخته شده و برای ایجاد آن، نیازی به معادلات ریاضی پیچیده و هم‌چنین انتخاب یک معادله ترمودینامیکی مناسب (که همیشه دغدغه آن برای مدل‌سازی یک برش نفتی وجود دارد)، وجود نخواهد داشت. اطلاعات اولیه مثال موردی مورد نظر از یکی از میادین نفتی آزادگان اخذ شده است، که در شکل ۳ و جدول ۱ نشان داده شده است.

ویژگی مخلوط شدن جریان‌ها برای یک FCV، مصداق بارز کاربرد مهندسی شیمی منطق فازی است. در ریاضیات منطق فازی، عملگرهای مختلفی از جمله اشتراک، اجتماع، تفاضل و ... وجود دارد که توسط روابطی تعریف می‌شوند. از آنجایی که در متغیر FCV، درجه تعلق هر یک از مجموعه‌های فازی نماینده‌ای کیفی از مقدار درصد مولی ماده متناظر است، می‌توان به کمک عملگر اجتماع (s-norm) [۱۲]، مقدار ترکیب درصد فازی نهایی را توسط رابطه زیر به‌دست آورد.

$$S(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)) = \min\{1, \mu_A(x_1) + \mu_A(x_2)\} \quad (6)$$

البته بایستی توجه شود که اگر دبی مولی دو جریان فازی که با هم مخلوط می‌شوند، با یکدیگر فرق داشته باشد، باید میزان درجه تعلق هر یک براساس دبی مولی‌شان همسان‌سازی<sup>۱</sup> شود و سپس در رابطه ۶ قرار داده شود. هم‌چنین رابطه فوق برای دو جریان نوشته شده است، در حالی برای چند جریان نیز قابل استفاده است. ویژگی‌های FCV، ضمن پیاده‌سازی در مثال موردی که در ادامه ارائه خواهد شد، بیشتر توضیح داده می‌شوند.



شکل ۳ تبخیر ناگهانی نفت خام

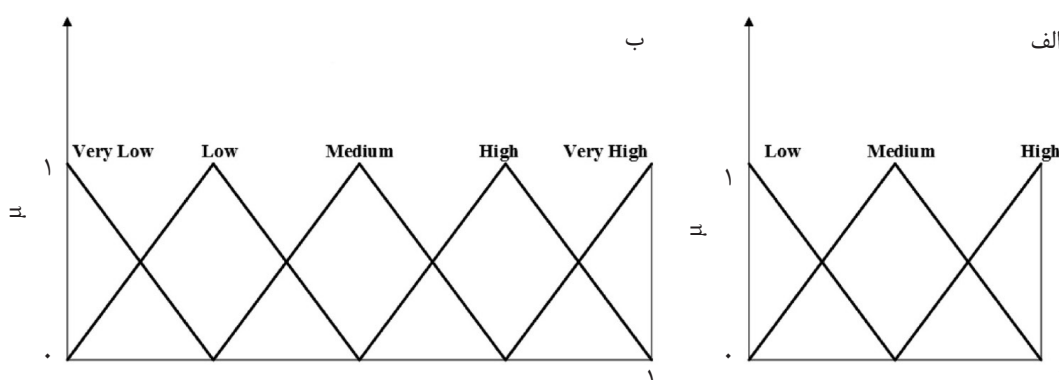
1. Operator  
2. Normalized

جدول ۱ شرایط خوراک مثال موردی تبخیر ناگهانی نفت خام

۴۰		دما (°C)	
۷۰۰		فشار (kPa)	
درصد مولی مواد			
۰/۰۰۲	H <sub>2</sub> S	۰/۱۸۵	CH <sub>4</sub>
۰/۰۰۱	N <sub>2</sub>	۰/۰۴۸	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
۰/۰۱	CO <sub>2</sub>	۰/۰۳۴	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
۰/۴۳۴	Oil cut ۱ با نقطه جوش °C ۲۲۳	۰/۰۰۵	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
۰/۱۳۱	Oil cut ۲ با نقطه جوش °C ۴۵۶	۰/۰۱۵	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
۰/۰۸۳	Oil cut ۳ با نقطه جوش °C ۶۵۰	۰/۰۰۶	i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
۰/۰۴۳	Oil cut ۴ با نقطه جوش °C ۹۰۱	۰/۰۰۶	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
		۰/۰۰۵	n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>

FCV معرفی شده در این مقاله استفاده می‌شود. تعداد مواد موجود در این مدل، ۱۵ می‌باشد. بدین ترتیب، FCV شامل ۱۵ مجموعه فازی خواهد بود. روش معمولی که در مدل‌سازی‌های مربوط به نفت خام استفاده می‌شود، تعریف برش‌های مختلف برای نفت است. با توجه به ویژگی‌های بیان شده برای متغیر FCV، و به منظور ساده‌سازی و کاهش هر چه بیشتر تعداد قوانین مدل، موادی که دارای فراریت مشابه هستند، را به کمک رابطه ۵ ادغام کرده و تعداد مجموعه‌های فازی به ۶ کاهش می‌یابد. روش کار به این صورت است که مخلوط CH<sub>4</sub> و N<sub>2</sub> به‌عنوان ماده ادغام شده تحت عنوان "Light Gas"، مخلوط C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>، C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>، i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>، n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>، CO<sub>2</sub> و i-C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>، n-C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>، n-C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>، H<sub>2</sub>S به‌عنوان "Heavy Gas" و مشابه برش‌های تعریف شده در نرم‌افزار Petro-SIM، ۴ مجموعه فازی دیگر شامل "Heavy Oil"، "Relatively Heavy Oil"، "Light Oil" و "Very Heavy Oil" نام‌گذاری و تعریف شدند. توجه شود که علی‌رغم اینکه تعداد مواد زیادی در مجموعه فازی ادغام شده تحت عنوان "Heavy Gas" در نظر گرفته شده‌اند، ولی مقدار خیلی از آنها عملاً بسیار کم بوده و خطای حاصل از این کار ناچیز خواهد بود.

به منظور اعتبارسنجی مدل، فرآیند مورد نظر در نرم‌افزار Petro-SIM شبیه‌سازی شده و علاوه‌بر شرایط عملیاتی جدول ۱، برای شرایط مختلف دما و فشار و انواع مختلف ترکیب درصد خوراک، داده‌های مورد نیاز ایجاد شده است. هدف اصلی در مدل مورد نظر، پیش‌بینی ترکیب درصد جریان‌های خروجی بخار (y) و مایع (x) و هم‌چنین نسبت دبی مایع به خوراک (L/F) خروجی است. برای پیش‌بینی این متغیرهای خروجی، ورودی‌های مدل شامل دما (T)، فشار (P) و ترکیب درصد خوراک (z)، شکل ۳ در نظر گرفته شده است. اولین گام در ساختن مدل مورد نظر، فازی‌سازی متغیرها است، بدین صورت که برای متغیرهای دما، فشار و نسبت دبی مایع به خوراک، ۵ مجموعه فازی و برای متغیرهای ترکیب درصد (شامل x، y و z)، ۳ مجموعه فازی در نظر گرفته شده است. به‌عنوان ساده‌ترین و پرکاربردترین تابع عضویت [۱۴ و ۱۵]، از تابع عضویت مثلثی متقارن مطابق شکل ۴ استفاده شده است. دومین گام، نوشتن قوانین فازی برای همه حالت‌های ممکن از متغیرهای ورودی مدل است. با توجه به تعداد مجموعه‌های فازی در نظر گرفته شده، تعداد قوانین با استفاده از رابطه ۲، ۵ × ۵ × ۳<sup>۰</sup> خواهد بود، که نشان از بالا بودن آن و غیرممکن بودن ساخت مدل فازی است. حال، مفهوم جدید



شکل ۴ مجموعه‌های فازی در نظر گرفته شده برای الف) ترکیب درصد مولی مواد (ب) دما، فشار و نسبت دبی مایع به خوراک

از این کاهش ناچیز دقت پیش‌بینی می‌توان چشم پوشی کرد. بدیهی است که برای افزایش دقت، می‌توان از انواع دیگر ادغام مواد به طوری که منجر به تعداد مجموعه‌های فازی بیشتری شود و یا از روش‌های هیبریدی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (و یا به طور کلی الگوریتم‌های تکاملی) استفاده کرد. نکته مهم اینجاست که پارامترهای مدل فازی توسعه داده شده آنقدر متنوع هستند که می‌توان با بهینه کردن آنها تا حد زیادی خطای مدل را کاهش داد. این پارامترها عبارتند از تعداد و شکل مجموعه‌های فازی اختصاص داده شده برای متغیرهای فازی، تعداد در نظر گرفته شده مجموعه‌های فازی برای ادغام مواد در تعریف متغیر فازی ادغام شده و ... در جدول ۳ چند نمونه از قوانین مورد استفاده در مدل نشان داده شده است. توجه شود که مقدار ترکیب درصد مولی در فار مایع (x) می‌تواند با توجه به موازنه مولی به دست آید.

### نتایج و بحث

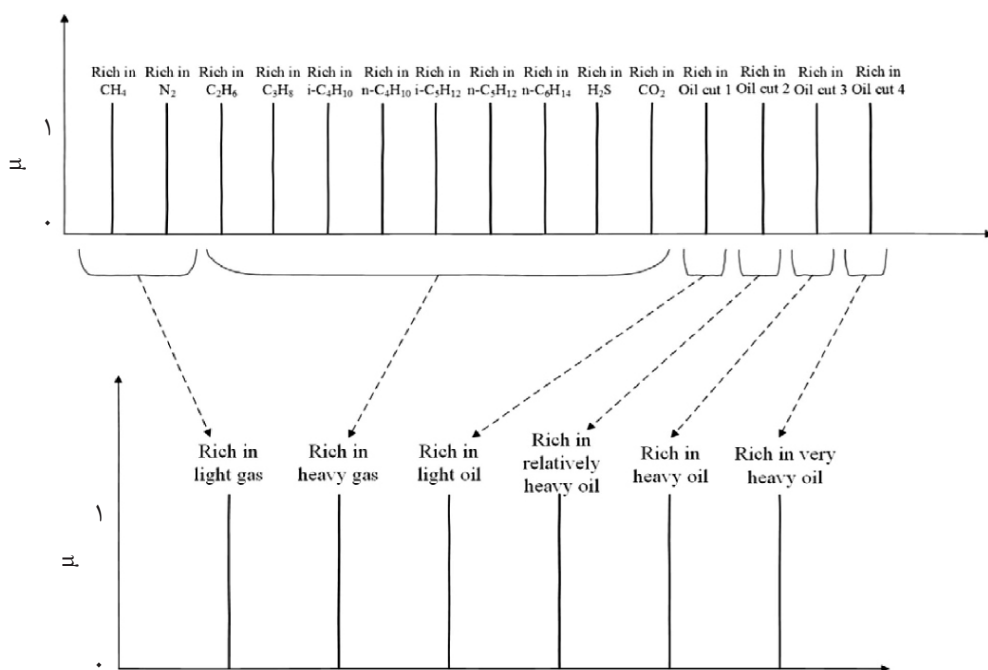
برای نشان دادن نتایج مدل به ازای شرایط مختلف خوراک، شامل دما، فشار و ترکیب درصدی مختلف، خروجی مدل فازی و نرم‌افزار Petro-SIM با هم مقایسه شده و در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. خطا توسط رابطه زیر به دست آمده است:

$$Error = \left| \frac{y_m - y_h}{y_h} \right| \quad (7)$$

شکل ۵ نمایانگر متغیر FCV در این مثال موردی و نحوه ادغام کردن آن است. در جدول ۲، تعداد قوانین فازی برای هر یک از حالت‌های استفاده و عدم استفاده از مفهوم جدید FCV نمایش داده شده است، که نشان از کاهش چشمگیر تعداد قوانین و ساده‌تر شدن مدل است.

حال قوانین حاکم بر فرآیند به کمک متغیر FCV و تنها به کمک دانش شهودی مربوط به فرآیند تعادل ترمودینامیکی بین فاز بخار و مایع نوشته می‌شوند. طبیعی است که در یک فرآیند تبخیر ناگهانی، مواد فرارتر تمایل به حضور بیشتر در فاز بخار و مواد سنگین‌تر تمایل به حضور بیشتر در فاز مایع دارند. هم‌چنین هر چه دما بالاتر رود و یا متناظر با آن فشار پایین‌تر بیاید، نرخ ورودی مواد سنگین از فاز مایع به فاز بخار بیشتر می‌شود و نسبت L/F کاهش می‌یابد. چنین مفاهیم ترمودینامیکی که تنها نیاز به دانش شهودی دارند، در مدل پیشنهادی به سادگی در قالب قوانین فازی و به کمک مفهوم فازی توسعه داده شده، پیاده‌سازی شده و مدل فازی ممدانی مورد نظر را می‌سازند. هم‌چنین، استفاده از مفهوم جدید FCV، تجزیه و تحلیل مدل و نوشتن قوانین را تسهیل کرده است. البته ذکر این نکته نباید فراموش شود که استفاده از FCV به خصوص وقتی از ویژگی ادغام مواد آن استفاده شده، می‌تواند باعث کاهش دقت پیش‌بینی مدل شود. اما مزایای آن آنقدر قابل توجه می‌باشد که





شکل ۵ FCV تعریف شده برای خوراک نفت خام و روند ادغام شدن آن

جدول ۲ تعداد قوانین مدل فازی برای حالت‌های مختلف فازی سازی متغیرها (استفاده و عدم استفاده از متغیر FCV)		
تعداد قوانین	تعداد متغیرهای ورودی	حالت‌ها
$3^{10} \times 5 \times 5$	۱۷	حالت اول: بدون استفاده از FCV
$15 \times 5 \times 5 = 375$	۳	حالت دوم: با استفاده از FCV، بدون استفاده از روش ادغام کردن مواد
$6 \times 5 \times 5 = 150$	۳	حالت سوم: با استفاده از FCV، و با ادغام کردن مواد به ۶ ماده Lumped

جدول ۳ نمونه‌هایی از قوانین حاکم بر فرآیند	
1. If (z is Rich in light oil) and (T is Very Low) and (P is Low),	Then (y is Rich in light gas) and (L/F is Medium)
2. If (z is Rich in heavy gas) and (T is Medium) and (P is Medium),	Then (y is Rich in heavy gas) and (L/F is Low)
3. If (z is Rich in light oil) and (T is High) and (P is Very low),	Then (y is Rich in light gas) and (L/F is Low)

جدول ۴ مقایسه نتایج مدل فازی ممدانی و خروجی‌های PetroSIM

مقادیر متغیرهای ورودی (شرایط عملیاتی)													
T	P	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$						
۴۰	۷۰۰	۰/۲۴	۰/۰۹	۰/۴۳	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۰۳						
مقادیر متغیرهای خروجی													
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	L/F
Petro-SIM	۰/۸۷	۰/۱۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۷	۰/۵۷	۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۷۶
مدل	۰/۸۴	۰/۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۶	۰/۵۸	۰/۱۷	۱/۱	۰/۰۵	۰/۶۸
خطا	% ۳	% ۳۰	-	-	-	-	-	% ۱۴	% ۲	۰	۰	۰	% ۱۰
95PPU	% ۸۴	% ۸۴	-	-	-	-	-	% ۹۹	% ۹۹	% ۸۹	% ۹۹	% ۹۹	% ۹۶
مقادیر متغیرهای ورودی (شرایط ۱- دمای معمولی، فشار پایین تر و خوراک سبک‌تر)													
T	P	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$						
۳۰	۲۵۰	۰/۲۹	۰/۱۱	۰/۳۸	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۰۳						
مقادیر متغیرهای خروجی													
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	L/F
Petro-SIM	۰/۸۲	۰/۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۶	۰/۵۸	۰/۱۸	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۶۶
مدل	۰/۷۴	۰/۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۸	۰/۵۶	۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۶۵
خطا	% ۸	% ۱۷	-	-	-	-	-	% ۳۳	% ۳	% ۵	۰	۰	% ۱
مقادیر متغیرهای ورودی (شرایط ۲- دمای پایین تر، فشار معمولی و خوراک سنگین‌تر)													
T	P	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$						
۱۰	۵۵۰	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۵۵	۰/۱۶	۰/۱۰	۰/۰۴						
مقادیر متغیرهای خروجی													
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	L/F
Petro-SIM	۰/۹۳	۰/۰۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۴	۰/۵۹	۰/۱۸	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۹۱
مدل	۰/۹۲	۰/۰۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۳	۰/۵۹	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۷۵
خطا	% ۱	% ۱۴	-	-	-	-	-	% ۲۵	۰	% ۶	% ۹	۰	% ۱۸
مقادیر متغیرهای ورودی (شرایط ۳- دما و فشار بالاتر و خوراک سنگین‌تر)													
T	P	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$						
۶۰	۸۰۰	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۵۸	۰/۱۸	۰/۱۱	۰/۰۴						
مقادیر متغیرهای خروجی													
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	L/F
Petro-SIM	۰/۹۳	۰/۰۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲	۰/۶۰	۰/۱۸	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۹۶
مدل	۰/۹۴	۰/۰۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰/۶۲	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۸۲
خطا	% ۱	% ۱۴	-	-	-	-	-	% ۵۰	% ۳	% ۶	% ۹	۰	% ۱۵

یا مشکل است، می‌تواند بسیار کمک کننده باشد.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید جهت مدل‌سازی فازی با ساختار ممدانی پیشنهاد شد که در آن مفهومی نوین تحت عنوان ترکیب درصد فازی یا FCV معرفی گردید. این متغیر به این صورت تعریف می‌شود که همه متغیرهای ترکیب درصد مدل را با هم ترکیب کرده و حالت‌های مختلف آن را در نوشتن قوانین در نظر می‌گیرد. نشان داده شد که با استفاده از این متغیر می‌توان یکی از مهمترین مشکلات روش ممدانی که تعداد بالای قوانین آن است را برای مدل‌سازی سیستم‌هایی که متغیر ترکیب درصد در بین متغیرهای ورودی سیستم دیده می‌شوند، تا حد زیادی مرتفع کرد.

برای نشان دادن قابلیت‌های روش پیشنهادی، از آن برای مدل‌سازی فازی فرآیند تبخیر ناگهانی نفت خام که دارای تعداد متغیرهای بالا و ماهیتی پیچیده بوده و نیاز به محاسبه پارامترهای مختلف دارد، استفاده شد. ساخت مدل، تنها نیاز به دانش شهودی مربوط به فرآیند داشت، به طوری که به کمک متغیر FCV، قوانین فازی بیان‌گر رفتار تعادلی تبخیر ناگهانی نوشته شد. در توسعه مدل مورد نظر، هیچ نیازی به داده‌های فرآیندی، محاسبه پارامترهای مختلف و یا حل انواع مختلف معادلات ریاضی (که در سایر روش‌های مدل‌سازی دیده می‌شود) وجود نداشت. هدف، پیش‌بینی متغیرهای ترکیب درصد و نسبت مایع به خوراک به ازای شرایط مختلف خوراک در دما، فشار و ترکیب درصدهای مختلف بود. در حالی که در مدل اولیه، تعداد متغیرهای ورودی ۱۷ عدد بود، به کمک متغیر FCV و با استفاده از ویژگی ادغام یا Lumping آن، تعداد متغیرهای ورودی به ۳ تقلیل پیدا کرد، به طوری که تعداد قوانین مدل بیش از ۹۵٪ کاهش یافت. همچنین، نتایج حاکی از دقت بالای ۸۵٪ مدل به دست آمده بود. این روش برای انجام

هم‌چنین، برای بررسی عدم قطعیت پیش‌بینی‌های مدل، از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و شاخص آماری 95PPU استفاده شده و در جدول ۳ برای خروجی‌های مدل (در حالت شرایط عملیاتی) نشان داده شده است. شاخص آماری 95PPU درصد قرارگیری داده‌های اندازه‌گیری در محدوده اطمینان ۹۵٪ را نشان می‌دهد و توسط رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$95PPU = \frac{N_{Cl}}{N} \times 100 \quad (8)$$

توجه شود از آنجایی که مقدار حضور برش‌های نفتی در فاز بخار و به همین ترتیب مقدار حضور گاز سبک در فاز مایع بسیار ناچیز است، اعداد مربوط به این متغیرها تقریباً صفر در نظر گرفته شده است. برای هر فاز ۶ ترکیب درصد به دست آمده که اندیس ۱ تا ۶ به ترتیب از Light Gas شروع شده و به Very Heavy Oil ختم می‌شوند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پیش‌بینی متغیرهای خروجی با دقت خوبی و محدوده اطمینان بالایی انجام می‌شود، به طوری که می‌توان دقت کلی بالای ۸۵٪ را برای آن در نظر گرفت. البته پیش‌بینی بعضی متغیرها مانند مقدار حضور گاز سنگین در فاز مایع، مقداری پیچیده بوده و شهود کافی در مقایسه با سایر متغیرها در آن وجود ندارد و به همین دلیل در مقایسه با سایر متغیرها با دقت پایین تری پیش‌بینی شده است.

بنابراین، به کمک روش توسعه داده شده، می‌توان با دقتی مناسب و با تعداد کمی قانون، یک پدیده غیرخطی و پیچیده که شامل تعداد متغیرهای زیاد است، را مدل‌سازی کرد. برای این مدل، عملاً هیچ نیازی به حل معادلات مختلف ریاضی و یا محاسبه دردرساز پارامترهای مختلف معادلات ترمودینامیکی نیست و زمان محاسبات هم در مقایسه با روش‌های دیگر مدل‌سازی سنتی کمتر است. از طرف دیگر، چنین روشی، نیازی به داده‌های فرآیندی ندارد و برای فرآیندهایی که اندازه‌گیری داده برای آنها هزینه بر و

محاسبات تعادلی مخلوط‌هایی که محاسبه خواص تعادلی آنها سخت و یا غیرممکن است، نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

### علائم و نشانه‌ها

- $N_{Cl}$ : تعداد داده‌های در محدود اطمینان
- $Z$ : ترکیب درصد جریان خوراک
- $P$ : فشار (kPa)
- $\mu_i$ : درجه تعلق مجموعه فازی  $i$  ام
- $r$ : تعداد مجموعه‌های فازی تعریف شده برای (FCV)
- $\mu_A(x_1)$ : درجه تعلق مجموعه فازی برای جریان فازی
- $R$ : تعداد قوانین مدل فازی
- $\mu_A(x_2)$ : درجه تعلق مجموعه فازی برای جریان فازی
- $S$ : عملگر اجتماع محدود (Bounded Sum Operator)
- $\mu_{j-lumped}$ : درجه تعلق هر یک از مجموعه فازی ادغام شده
- $FS$ : تعداد مجموعه‌های فازی (Fuzzy Set)
- $x$ : ترکیب درصد جریان‌های خروجی مایع
- $l$ : تعداد مواد ادغام شده در هر مجموعه فازی
- $T$ : دما ( $^{\circ}C$ )
- $L/F$ : نسبت دبی مایع به خوراک
- $y$ : ترکیب درصد جریان‌های خروجی بخار
- $n$ : تعداد متغیرهای ورودی مدل
- $y_m$ : متغیر پیش‌بینی شده توسط مدل
- $N$ : تعداد داده‌ها
- $y_h$ : متغیر پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار Petro-SIM

### مراجع

- [1]. Matía, F., Marichal, G.N. and Jiménez, E. eds., "Fuzzy modeling and control: theory and applications," Atlantis Press, 2014.
- [2]. Madaeni S. S. and A. R. Kurdian., "Fuzzy modeling and hybrid genetic algorithm optimization of virus removal from water using microfiltration membrane," Chemical Engineering Research and Design, Vol. 89, No. 1, pp. 456-470. 2011.
- [3]. Nelles Oliver, "Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models," Springer Science & Business Media, 2013.
- [4]. Takagi T. and Sugeno M., "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, Vol. 1, pp.116-132, 1985.
- [5]. Mamdani E. H. and Assilian S., "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," International Journal of Man-machine Studies, Vol. 7, No. 1, pp.1-13, 1975.
- [6]. Adoko A. C., Gokceoglu C., Wu L. and Zuo Q. J., "Knowledge-based and data-driven fuzzy modeling for rock-burst prediction," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 61, pp. 86-95, 2013.
- [7]. Cordón O., "A historical review of evolutionary learning methods for Mamdani-type fuzzy rule-based systems: Designing interpretable genetic fuzzy systems," International Journal of Approximate Reasoning, Vol. 52, No. 6, pp.894-913, 2011.
- [8]. Araromi D. O., Sonibare J. A. and Emuoyibofarhe J. O., "Fuzzy identification of reactive distillation for acetic acid recovery from waste water," Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 2, No. 3, pp.1394-1403, 2014.

- [9]. Krzywanski J. and Nowak W., "Modeling of bed-to-wall heat transfer coefficient in a large-scale CFBC by fuzzy logic approach," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 94, pp.327-334, 2016.
- [10]. Štampar S., Sokolič S., Karer G., Žnidaršič A. and Škrjanc I., "Theoretical and fuzzy modelling of a pharmaceutical batch reactor," Mathematical and Computer Modelling, Vol. 53, No. 5, pp. 637-645, 2011.
- [11]. Ahmadi M. A. and Ebadi M., "Fuzzy modeling and experimental investigation of minimum miscible pressure in gas injection process," Fluid Phase Equilibria, Vol. 378, pp.1-12, 2014.
- [12]. Zimmermann H. J., "Fuzzy set theory," Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, Vol. 2, No. 3, pp. 317-332, 2010.
- [13]. Frick T. C. ed, "Petroleum production handbook: reservoir engineering," Vol. 2, McGraw-Hill, 1962.
- [14]. Pedrycz W., "Why triangular membership functions?," Fuzzy sets and Systems, Vol. 64, No. 1, pp. 21-30, 1994.
- [15]. Dyck R., Sadiq R., Rodriguez M., Simard S. and Tardif R., "A comparison of membership function shapes in a fuzzy-based fugacity model for disinfection byproducts in indoor swimming pools," International Journal of System Assurance Engineering and Management, Vol. 8, No. 4, pp.2051-2063, 2017.