

# اندازه‌گیری و بررسی ترمودینامیکی گرانی و دانسیته مخلوط سه جزیی دی اتانول آمین (DEA) و ۲-آمینو ۲-متیل ۱-پروپانول (AMP) و آب

عاطفه رضایی، مسعود مفرحی\*، امیرعباس ایزدپناه  
دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

**چکیده:** تعیین ویژگی‌های فیزیکی و به دست آوردن پارامترهای مربوط به مدل‌های ترمودینامیکی در طراحی و شبیه‌سازی‌های واحدهای صنعتی جذب و دفع دی اکسید کربن در حلال‌های آمین ضروری است. در این کار گرانی و دانسیته مخلوط‌های دو و سه جزیی دی اتانول آمین و ۲-آمینو ۲-متیل ۱-پروپانول و آب در بازه دمایی ۳۰۳ K تا ۳۴۳ K اندازه‌گیری شد. با به کارگیری مدل‌های ترمودینامیکی حجم فزونی مخلوط‌های دو و سه جزیی با مدل ردلیش-کیستر مطابقت داده شد و میانگین خطای نسبی کم‌تر از ۳٪ برای تمام داده‌ها به دست آمد. مدل‌سازی گرانی و دانسیته دو جزیی با استفاده از مدل‌های Eyring-NRTL و Eyring-Wilson تعیین شد و برای پیش‌بینی رفتار مخلوط سه جزیی استفاده شد. نتیجه‌ها نشان داد مدل Eyring-Wilson از پیش‌بینی بهتری نسبت به مدل Eyring-NRTL برخوردار است، سرانجام گرانی سینماتیک توسط بسط ردلیش-کیستر همبسته و پارامترهای وابسته به دما تعیین شدند.

**واژگان کلیدی:** گرانی، دانسیته، حجم فزونی، ردلیش-کیستر، Eyring-NRTL، Eyring-Wilson

**KEYWORDS:** Viscosity, Density, Excess Volume, Redlich-kister, Eyring-NRTL, Eyring-Wilson

## مقدمه

[۳]. در میان این فناوری‌ها، جذب شیمیایی با استفاده از محلول آبی آمین‌ها، توسعه یافته‌تر و قابل اطمینان‌تر است [۴]. پرکاربردترین محلول‌های آمین شامل منواتانول آمین<sup>۱</sup>، دی اتانول آمین<sup>۲</sup> و متیل دی اتانول آمین<sup>۳</sup> هستند [۳]. آمین‌های با وزن مولکولی پایین مانند MEA و DEA ظرفیت جذب CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>S بیشتری در واحد وزن خود دارند که در نتیجه برای جذب مقدار مشخصی گاز اسیدی، به آمین در گردش کم‌تری احتیاج است [۵]. از طرفی میزان اتلاف آمین

فرایند شیرین‌سازی گازهای اسیدی یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین فرایندهای مهندسی شیمی به‌شمار می‌رود. از طرفی باتوجه به اهمیت استفاده از انرژی‌های پاک حذف گازهای اسیدی مانند CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>S از گاز طبیعی ضروریست [۱، ۲]. جمع‌آوری CO<sub>2</sub> از مخلوط‌های گازی می‌تواند از روش‌های گوناگونی مانند جذب فیزیکی و شیمیایی، تبرید و جذب انتخابی به وسیله جاذب جامد، جداسازی غشایی و جداسازی هیدراسیونی انجام شود

\* عهده‌دار مکاتبات

+Email: mofarahi@pgu.ac.ir

(۱) MEA  
(۲) MDEA

(۳) DEA

مدل‌های ترمودینامیکی و سایر روش‌های تعیین ویژگی‌های فیزیکی در منابع می‌باشد. همچنین در ادامه تعیین حجم فزونی انرژی گیس فزونی مخلوط برای تعیین انحراف گرانی دینامیک از محلول ایده‌آل با استفاده از معادله‌های ترمودینامیکی و تعیین پارامترهای قابل تنظیم معادله‌ها انجام پذیرفته است.

### بخش نظری

#### دانشیه (ρ)

برای مدل‌سازی دانشیه می‌توان از معادله ردلیش-کیستر<sup>۱</sup> برای تعیین حجم اضافی مخلوط استفاده کرد. معادله زیر میزان حجم اضافی یک محلول دو جزئی را نشان می‌دهد:

$$V_{12}^E = x_1 x_2 \sum_{i=0}^n A_i (x_1 - x_2)^i \quad (1)$$

در این معادله  $A_i$  پارامتر وابسته به دماست که برای سامانه دوجزیی کاربرد دارد.

$$A_i = a + b(T/K) + c(T/K)^2 \quad (2)$$

در محلول‌های سه جزئی و بالاتر می‌توان از بسط معادله (۱) استفاده نمود بنابراین:

$$V^E = V_{12}^E + V_{13}^E + V_{23}^E \quad (3)$$

از طرفی حجم فزونی به دست آمده از آزمایش‌های تجربی از معادله زیر تعیین می‌شود.

$$V^E = V^m - \sum_{i=1}^{nc} x_i V_i^0 \quad (4)$$

در این معادله  $V^m$  حجم مخلوط و  $V_i^0$  حجم جز خالص  $i$  در دمای سامانه است.

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^{nc} x_i M_i}{\rho_m} \quad (5)$$

در معادله (۵)،  $M_i$  جرم مولکولی جز  $i$  و  $\rho_m$  دانشیه مخلوط می‌باشد [۱۱].

#### گرانروی دینامیک (μ)

با توجه به تئوری ایرینگ<sup>۲</sup> که بر پایه انرژی فزونی گیس پایه‌گذاری شده است می‌توان مقدارهای گرانروی اضافی از حالت ایده‌آل را از معادله زیر به دست آورد.

$$\ln(\mu V) = \sum_{i=1}^{nc} x_i \ln(\mu_i V_i) + \frac{g^E}{RT} \quad (6)$$

در طول برج‌های جذب تابعی از فشار بخار آمین و دمای برج می‌باشد. چنانچه فشار بخار آمین پایین باشد روشن است مقدار آمینی که همراه گاز از برج خارج می‌شود، کمتر خواهد بود [۶]. همچنین آمین‌های نوع اول سرعت جذب بالایی دارند که سبب بهبود عملیات جذب می‌شود. در مقابل انرژی بازسازی (بازیابی) زیاد، خوردگی بالا و همچنین تمایل اکسایش با هوا دارند. امروزه پژوهشگران برای رفع این مشکلات و کمینه کردن هزینه‌ها پژوهش‌های خود را در برای فرمولاسیون آمین‌های جدید و یا ترکیب آمین‌های نوع سوم با آمین‌های نوع اول و دوم انجام می‌دهند [۷]. ویژگی‌هایی مانند دانشیه و گرانی در چند دمای گوناگون هم برای حلال‌های خالص و هم برای مخلوط حلال‌های دو و یا چند جزئی به منظور درک ویژگی‌های ترمودینامیکی در ارتباط با انتقال گرما و جریان سیال مفید می‌باشد [۸]. از سویی مقدارهای تجربی ویژگی‌های فیزیکی مخلوط حلال‌ها به‌ویژه دانشیه و گرانی عامل مهمی در طراحی فرایندهای جذب هستند [۹].

بررسی رفتار فیزیکی و شیمیایی سامانه‌های مایع، که شامل اندازه‌گیری دانشیه و ویژگی‌های فزونی مربوط به آن می‌شود، اطلاعات مهم و مفید متمرکزی راجع به برهمکنش‌های بین مولکولی در مایع‌ها و مخلوط‌های آن‌ها را فراهم می‌کند. اختلاط حلال‌های آمین به‌طور معمول منجر به شکل‌گیری محلول ایده‌آل می‌شود. ویژگی‌های ترمودینامیکی مخلوط‌های مایع چندجزئی و تجزیه و تحلیل آن‌ها در مطالعه رویکردهای نظری جدید برای حالت خالص و یا مخلوط و درک درست تأثیرهای مولکولی بسیار کمک خواهد کرد. چنین ویژگی‌هایی می‌توانند اطلاعات مستقیمی در مورد تأثیرهای انرژی ایجاد شده بین مولکول‌های موجود در مخلوط را ارائه دهند، به طوری که نوآوری‌هایی که در طول فرایند اختلاط رخ می‌دهد به خوبی تفسیر نمایند. توابع فزونی به علت اهمیت آن‌ها در استنباط برهمکنش‌های غالب در مخلوط مایع‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. از طرفی مقدارهای تجربی دانشیه و گرانی مخلوط‌های حلال در غلظت و دماهای گوناگون در طراحی ستون‌های جذب و همچنین طراحی تجهیزات جانبی از جمله مبدل‌های گرمایی و پمپ‌ها بسیار حایز اهمیت می‌باشند. بنابراین به دلیل گستردگی طیف دما و نسبت‌های حلال نیاز به مدل‌سازی و تعیین پارامترهای معادله‌های مربوط برای آن‌ها گریز ناپذیر خواهد بود [۱۰].

بر این اساس هدف از این پژوهش تعیین ویژگی‌های فیزیکی، از جمله گرانی و دانشیه مخلوط حلال‌های جدید در غلظت و نسبت‌های پرکاربرد صنعتی در بازه دمایی ۳۰۳ K تا ۳۴۳ K و تفسیر نتیجه‌های آزمایشگاهی به دست آمده با نتیجه‌های به دست آمده از

(۱) Redlich-kister

(۲) Eyring theory

همان‌گونه که دیده می‌شود می‌توان با فرض خالص بودن هر دو جز، مقدار انحراف گرانی هر دو مخلوط را تعیین نمود و سرانجام از جمع جبری آن‌ها برای مخلوط سه جزیی و یا بیشتر استفاده نمود [۱۳].

### بخش تجربی

مواد شیمیایی به کار رفته در این پژوهش شامل DEA با درجه خلوص ۸۵٪ از مجتمع گازی عسلویه و AMP با خلوص ۹۹٪ تولید کمپانی مرک<sup>۱</sup> و آب مقطر به دست آمده از دستگاه اسمز معکوس بدون خلوص سازی بیشتر می‌باشد. در ابتدا محلول‌های دوجزیی از AMP+H<sub>2</sub>O، DEA+H<sub>2</sub>O و AMP+DEA بصورت وزنی/وزنی ساخته شده و سرانجام مخلوط سه جزیی AMP+DEA+H<sub>2</sub>O در غلظت (کل) ۲۰٪ وزنی با نسبت‌های متفاوت از AMP و DEA تهیه شده است. گرانی و دانسیته به وسیله دستگاه ویسکومتر آنتون پار SVM3000 در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه خلیج فارس اندازه‌گیری شد.

### نتیجه‌ها و بحث

ابتدا روش تهیه محلول و برسنجی‌های لازم دستگاهی توسط باز تولید داده‌های موجود در منابع برای اعتبار سنجی داده‌های آزمایشگاهی انجام گرفت. همان‌گونه که در جدول ۱ دیده می‌شود میزان خطای نسبی نتیجه‌های آزمایشگاهی داده‌های دانسیته خالص و محلول در مقایسه با نتیجه‌های موجود در منابع از همخوانی بسیار خوبی برخوردار است. در شکل ۱ هریک از نقطه‌های به دست آمده برای ۵ دمای گوناگون با داده‌های موجود در منابع [۱۴] و [۱۵] مقایسه شده‌اند و همخوانی اندازه‌گیری دستگاه به خوبی دیده می‌شود. جدول ۲ مقادیرهای تجربی دانسیته، گرانی سینماتیک و گرانی دینامیک محلول‌های دوجزیی AMP+H<sub>2</sub>O و DEA+H<sub>2</sub>O و مخلوط‌های سه جزیی DEA+AMP+H<sub>2</sub>O در غلظت‌های گوناگون را نشان می‌دهد. در محلول‌های دو جزیی مقدار ویژگی‌های اضافی محلول به صورت آزمایشگاهی از معادله‌های (۴)، (۶) و (۱۳) به دست می‌آید سپس برای تعیین ثابت‌های معادله‌های (۲)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۵) از روش بهینه‌سازی سیمپلکس<sup>۲</sup> به کمک نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در این روش تابع هدف به صورت معادله (۱۷) تعریف می‌شود:

$$OF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X^{Expt} - X^{Cal}|}{X^{Expt}} \quad (17)$$

در این تابع، مقدار  $X^{Cal}$  داده محاسبه شده و مقدار داده

در این معادله میزان انحراف گرانی از محلول ایده‌آل با مقدار  $\frac{g^E}{RT}$  برابر است. همچنین  $\mu$  گرانی مخلوط و  $\mu_i$  گرانی جز خالص  $i$  می‌باشد. برای تعیین مقدار  $V$  از معادله (۷) استفاده می‌شود.

$$V = \sum_{i=1}^{nc} x_i V_i \quad (7)$$

مقدار  $\frac{g^E}{RT}$  در مدل ویلسون از معادله (۸) و در مدل NRTL از معادله (۹) تعیین می‌شود.

$$\frac{g^E}{RT} = \sum_{i=1}^{nc} x_i \ln \left( \sum_{j=1}^{nc} \lambda_{ij} x_j \right) \quad (8)$$

$$\frac{g^E}{RT} = \frac{\sum_{i=1}^{nc} x_i \sum_{j=1}^{nc} \tau_{ji} G_{ji} x_j}{\sum_{k=1}^{nc} G_{ki} x_k} \quad (9)$$

$\lambda_{ji}$ ،  $G_{ji}$  و  $\tau_{ji}$  پارامترهای انرژی متقابل بین دو جز هستند که برای تعیین مقدارهای آن‌ها از دو مدل ویلسون و NRTL به ترتیب از معادله‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) استفاده شده است [۳].

$$\lambda_{ji} = \frac{V_j}{V_i} \exp \left[ - \frac{a_{ji} - b_{ij}}{RT} \right] \quad (10)$$

$$G_{ji} = \exp \left[ - \left( \frac{a_{ji} - b_{ij}}{RT} \right) \alpha_{ji} \right] \quad (11)$$

$$\tau_{ji} = \frac{a_{ji} - b_{ij}}{RT} \quad (12)$$

### گرانی سینماتیک (9)

یک روش دیگر برای تعیین گرانی استفاده از نوعی بسط ردلیش-کیستر در تعیین گرانی سینماتیک می‌باشد [۱۲] که شکل کلی آن در معادله (۱۳) نشان داده شده است.

$$\partial v = \ln(v_m) - \sum_{i=1}^{nc} x_i \ln(v_i) \quad (13)$$

در این معادله  $\partial v$  انحراف گرانی سینماتیک،  $v_m$  گرانی سینماتیک مخلوط،  $nc$  تعداد اجزاء و  $v_i$  گرانی جز خالص  $i$  می‌باشد. در مخلوط دو جزیی  $\partial v$  را می‌توان از معادله (۱۴) تعیین نمود که در این معادله  $A_i$  پارامتر دوتایی است که وابستگی آن به دما به صورت معادله (۱۵) فرض شده است.

$$\partial v_{12} = x_1 x_2 \sum_{i=1}^k A_i (x_1 - x_2)^i \quad (14)$$

$$A_i = a + \frac{b}{T(K)+c} \quad (15)$$

در مخلوط‌های سه‌جزیی و بیشتر می‌توان با فرض مخلوط‌های ساده مایع به صورت دو جزیی از بسط معادله (۱۴) استفاده نمود.

$$v^E = v_{12}^E + v_{13}^E + v_{23}^E \quad (16)$$

(۱) Merck Millipore

(۲) Fminsearch function

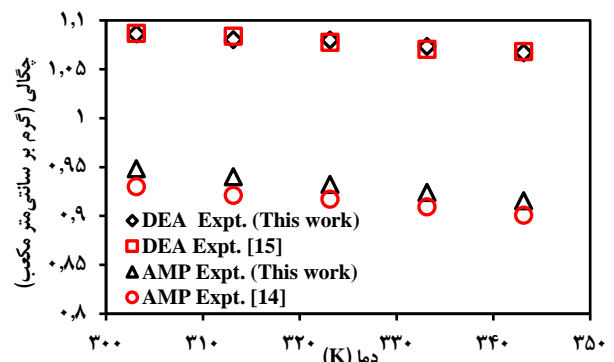
جدول ۲ - داده‌های آزمایشگاهی دانسیته، گرانشی دینامیک و سینماتیک محلول‌های دوجزبی و سه جزبی

AMP+H <sub>2</sub> O : ۲۰ wt% AMP			
دما (K)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (mPa.s)	$\nu$ (mm <sup>2</sup> /s)
۳۰۳	۰/۹۹۳۷	۲/۰۸۶۵	۲/۰۹۹۷
۳۱۳	۰/۹۸۸۶	۱/۵۹۳۴	۱/۶۱۱۸
۳۲۳	۰/۹۸۳۲	۱/۲۲۹۷	۱/۲۵۰۷
۳۳۳	۰/۹۷۷۴	۱/۰۰۷۷	۱/۰۳۱۰
۳۴۳	۰/۹۷۱۰	۰/۸۵۰۶	۰/۸۷۶۰
DEA+AMP : ۵ wt% DEA, ۱۵ wt% AMP			
دما (K)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (mPa.s)	$\nu$ (mm <sup>2</sup> /s)
۳۰۳	۰/۹۹۹۹	۱/۹۹۷۷	۱/۹۹۷۹
۳۱۳	۰/۹۹۵۰	۱/۵۷۵۵	۱/۵۸۳۴
۳۲۳	۰/۹۹۰۰	۱/۲۷۲۴	۱/۲۸۵۳
۳۳۳	۰/۹۸۳۸	۰/۹۵۵۲	۰/۷۲۵۰
۳۴۳	۰/۹۷۹۲	۰/۸۵۲۴	۰/۸۷۰۶
DEA : AMP : ۱۵ wt% DEA, ۵ wt% AMP			
دما (K)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (mPa.s)	$\nu$ (mm <sup>2</sup> /s)
۳۰۳	۱/۰۱۱۵	۱/۸۱۰۸	۱/۷۹۰۳
۳۱۳	۱/۰۰۷۱	۱/۴۱۱۲	۱/۴۰۱۳
۳۲۳	۱/۰۰۱۹	۱/۱۴۴۷	۱/۱۴۲۵
۳۳۳	۰/۹۹۷۴	۰/۹۴۸۶	۰/۹۵۱۱
۳۴۳	۰/۹۹۱۷	۰/۸۰۹۴۱	۰/۸۱۶۲
DEA+H <sub>2</sub> O : ۲۰ wt% DEA			
دما (K)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (mPa.s)	$\nu$ (mm <sup>2</sup> /s)
۳۰۳	۱/۰۱۸۰	۱/۷۵۳۵	۱/۷۲۲۴
۳۱۳	۱/۰۱۳۳	۱/۴۲۶۸	۱/۴۰۸۰
۳۲۳	۱/۰۰۶۹	۱/۲۰۹۵	۱/۲۰۱۲
۳۳۳	۱/۰۰۳۴	۱/۰۴۳۲	۱/۰۳۹۶
۳۴۳	۰/۹۹۸۵	۰/۸۱۴۴	۰/۸۱۵۶

ردلیش-کیستر ادامه داده شد تا جایی که کمترین میزان خطا در معادله (۱۷) به دست آمد. در معادله (۱۱)  $\alpha_{ji}$  فاکتور غیرتصادفی در معادله NRTL می‌باشد در منابع برای سامانه‌های مایع در تعیین گرانشی مقدار  $\alpha_{ji}$  بین ۰/۱ تا ۰/۳ گزارش شده است [۱۶]. در این کار دیده شد نتیجه‌های به دست آمده از مدل‌سازی با  $\alpha_{ji} = ۰/۱$  کمترین خطا را خواهند داشت بنابراین در تمامی محاسباتها  $\alpha_{ji} = ۰/۱$  در نظر گرفته شد. جدول‌های ۴ و ۵ قدرهای پارامترهای دوتایی  $b_{ij}$  و  $a_{ij}$  در محلول‌های دوجزبی را نمایش می‌دهند. همان‌گونه که گفته شد برای مخلوط‌های سه جزبی انرژی گیبس اضافی، مجموع انرژی‌های گیبس اضافی محلول‌های دو جزبی در نظر گرفته شد.

جدول ۱ - میزان خطای نسبی نتیجه‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری دانسیته AMP و DEA خالص و محلول در مقایسه با نتیجه‌های موجود در منابع

دانسیته AMP خالص			
خطای نسبی (برحسب درصد)	منبع	داده مرجع	داده آزمایشگاهی
۲/۲۷۷۸	[۱۴]	۰/۹۲۶۷	۰/۹۴۸۳
۲/۳۶۱۵	[۱۴]	۰/۹۱۷۹	۰/۹۴۰۱
۲/۴۱۳۹	[۱۴]	۰/۹۰۹۶	۰/۹۳۲۱
۲/۴۶۷۸	[۱۴]	۰/۹۰۱۱	۰/۹۲۳۹
۲/۵۴۵۰	[۱۴]	۰/۸۹۲۲	۰/۹۱۵۵
دانسیته DEA خالص			
خطای نسبی (برحسب درصد)	منبع	داده مرجع	داده آزمایشگاهی
۰/۱۱۹۹	[۱۵]	۱/۰۸۴۷	۱/۰۸۳۴
۰/۲۱۵۴	[۱۵]	۱/۰۷۷۴	۱/۰۷۷۲
۰/۰۰۰	[۱۵]	۱/۰۷۰۳	۱/۰۷۰۳
دانسیته مخلوط ۲۰٪ وزنی DEA			
خطای نسبی (برحسب درصد)	منبع	داده مرجع	داده آزمایشگاهی
۰/۰۵۸۹	[۱۱]	۱/۰۱۸۶	۱/۰۱۸۰
۰/۱۵۷۹	[۱۱]	۱/۰۱۴۹	۱/۰۱۳۳
۰/۲۳۸۴	[۱۱]	۱/۰۰۹۳	۱/۰۰۶۹
۰/۱۶۹۴	[۱۱]	۱/۰۰۵۱	۱/۰۰۳۴
۰/۰۶۰۰	[۱۱]	۰/۹۹۹۱	۰/۹۹۸۵



شکل ۱ - اعتبارسنجی داده‌های آزمایشگاهی AMP خالص با مرجع [۱۴] و DEA خالص با مرجع [۱۵]

آزمایشگاهی می‌باشد. پارامترهای هر معادله با کمینه سازی تابع هدف محاسبه می‌شوند. سپس با کمک ثابت‌های به دست آمده مقادیرهای ویژگی‌های اضافی در مخلوط‌های سه جزبی را برای هر دو جز تعیین نموده و سرانجام ویژگی‌های اضافی مخلوط سه جزبی، مجموع حسابی سه محلول دوجزبی در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۳ پارامتر  $A_i$  در معادله (۱) برای محلول‌های دوجزبی در دماهای ۳۰۳ K تا ۳۴۳ K را ارائه می‌دهد. در این کار بسط

جدول ۶ - ضریب‌های معادله ردلیش-کیستر در تعیین گرانشی سینماتیک برای محلول‌های دوجزیی DEA، H<sub>2</sub>O و AMP در بازه دمایی ۳۰۳ K تا ۳۴۳ K

DEA+H <sub>2</sub> O : ۲۰ wt% DEA				
دما (K)	A <sub>i</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
۳۰۳	۳/۱۴۴۴	-۸/۰۳۳	۳/۰۵۹۸	-۰/۴۸۳۷
۳۱۳	۳/۱۴۴	-۸/۰۳۳۲	۳/۰۵۹۵	-۰/۴۸۳۲
۳۲۳	۳/۱۴۳۶	-۸/۰۳۳۴	۳/۰۵۹۳	-۰/۴۸۲۷
۳۳۳	۳/۱۴۳۳	-۸/۰۳۳۵	۳/۰۵۹۱۱	-۰/۴۸۲۲
۳۴۳	۳/۱۴۳	-۸/۰۳۳۷	۳/۰۵۸۹	-۰/۴۸۱۸
AMP+H <sub>2</sub> O : ۲۰ wt% AMP				
دما (K)	A <sub>i</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
۳۰۳	-۱۴۹/۴۳۲	-۶۹۰/۱۰۰	-۱۱۵/۸۳۴	-۴۹۴/۸۳۰۲
۳۱۳	-۱۴۹/۴۴۷	-۶۹۰/۱۰۶	-۱۱۵/۸۲۲	۵۰۰/۶۴۱۳
۳۲۳	-۱۴۹/۴۶۱	-۶۹۰/۱۳۸	-۱۱۵/۸۱۱	۵۰۰/۶۲۰۴
۳۳۳	-۱۴۹/۴۷۵	-۶۹۰/۱۶۷	-۱۱۵/۸۰۰	۵۰۰/۶۲۶۷
۳۴۳	-۱۴۹/۴۸۸	-۶۹۰/۱۹۲	-۱۱۵/۷۹۱	۵۰۰/۶۲۴۹
DEA+AMP : ۲۵ wt% DEA				
دما (K)	A <sub>i</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
۳۰۳	۱۰۶۳/۴۲۱	-۷۲۶/۹۲۵	۱۳۰/۶۹۸۳	۵۲۴/۱۷۸۹
۳۱۳	۱۰۶۳/۴۰۸	-۷۲۶/۹۷۳	۱۲۳/۳۰۱۳	۵۱۱/۷۹۶۰
۳۲۳	۱۰۶۳/۳۹۶	-۷۲۷/۰۲۶	۱۲۱/۶۰۵۲	۵۰۹/۰۵۸۹
۳۳۳	۱۰۶۳/۳۸۵	-۷۲۷/۰۸۵	۱۲۰/۸۵۲۷	۵۰۷/۴۲
۳۴۳	۱۰۶۳/۳۷۵	-۷۲۷/۱۵۲	۱۲۰/۴۲۷۷	۵۰۱/۵۵۵۲

جدول ۶ پارامترهای A<sub>i</sub> در معادله (۱۴) را نشان می‌دهد. در تعیین این پارامترها نیز از معادله (۱۷) برای به حداقل رساندن میزان خطا بین داده‌های تجربی و نتیجه‌های به دست آمده از مدل‌سازی به‌عنوان تابع هدف استفاده شده است. برای مدل‌سازی گرانشی سینماتیک بسط چهارجمله‌ای معادله (۱۴) میزان تطابق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. حال آن که در تعیین پارامترهای معادله (۱) بسط سه جمله‌ای به‌خوبی با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت می‌نماید. علت این امر میزان و نوع وابستگی تابع هدف (دانسیته یا گرانشی سینماتیک) به دما می‌باشد. مطالعات پیشین تطابق نتیجه‌ها را در محلول‌های همانند نشان می‌دهد [۱۷-۱۹]. همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، هر سه محلول (20 wt% AMP) AMP+H<sub>2</sub>O، (25 wt% DEA) DEA+AMP و (20 wt% AMP) DEA+H<sub>2</sub>O دارای انحراف منفی از محلول ایده‌آل هستند. علت این امر وجود پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌هاست که سبب افزایش تراکم و در نتیجه کاهش حجم محلول نسبت به

جدول ۳ - ضریب‌های معادله ردلیش-کیستر در تعیین حجم فزونی برای محلول‌های دوجزیی در بازه دمایی ۳۰۳ K تا ۳۴۳ K

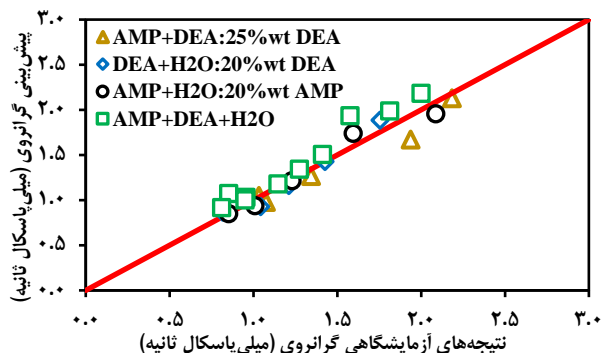
DEA+H <sub>2</sub> O : ۲۰ wt% DEA			
دما (K)	A <sub>i</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
۳۰۳	۱۰۰۷۷۹/۷	۱۶۴۸۷۰/۷	۱۵۱۱۳۸/۵
۳۱۳	۱۰۷۵۲۹/۶	۱۷۵۹۲۵/۶	۱۶۱۲۶۵/۳
۳۲۳	۱۱۴۴۹۸/۳	۱۸۷۳۳۹/۲	۱۷۱۷۲۰/۵
۳۳۳	۱۲۱۶۸۵/۷	۱۹۹۱۱۱/۵	۱۸۲۵۰۴
۳۴۳	۱۲۹۰۹۱/۹	۲۱۱۲۴۲/۶	۱۹۳۶۱۵/۹
AMP+H <sub>2</sub> O : ۲۰ wt% AMP			
دما (K)	A <sub>i</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
۳۰۳	۷۲۵۰۹/۳۷	۱۵۶۵۰۲/۹	۱۱۰۴۰۰/۸
۳۱۳	۷۷۳۶۴/۳	۱۶۶۹۸۹/۴	۱۱۷۷۹۵/۸
۳۲۳	۸۲۳۷۶/۴	۱۷۷۸۱۵/۹	۱۲۵۴۳۰/۶
۳۳۳	۸۷۵۴۵/۹	۱۸۸۹۸۲/۴	۱۳۳۳۰۵/۱
۳۴۳	۹۲۸۷۲/۶	۲۰۰۴۸۹	۱۴۱۴۱۹/۳
DEA+AMP : ۲۵ wt% DEA			
دما (K)	A <sub>i</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
۳۰۳	-۵۰۰۵۶/۶	۴۴۲۹۴۳/۲	۲۳۵۲۵۴/۳
۳۱۳	-۵۳۴۹۰/۳	۴۷۲۶۷۴/۸	۲۵۱۰۴۱/۱
۳۲۳	-۵۷۰۳۷/۸	۵۰۳۳۷۲/۱	۲۶۷۳۴۰/۶
۳۳۳	-۶۰۶۹۹/۲	۵۳۵۰۳۵	۲۸۴۱۵۲/۸
۳۴۳	-۶۴۴۷۴/۴	۵۶۷۶۶۳/۶	۳۰۱۴۷۷/۶

جدول ۴ - پارامترهای دوتایی معادله NRTL برای محلول‌های دوجزیی DEA، H<sub>2</sub>O و AMP در بازه دمایی ۳۰۳ K تا ۳۴۳ K

سامانه	a <sub>۱۲</sub> ×۱۰ <sup>۷</sup>	b <sub>۱۲</sub> ×۱۰ <sup>۷</sup>	a <sub>۲۱</sub> ×۱۰ <sup>۷</sup>	b <sub>۲۱</sub> ×۱۰ <sup>۷</sup>
DEA+H <sub>2</sub> O (۲۰ wt% DEA)	-۳/۶۵۰۲	۲/۰۸۶۵	۰/۶۹۸۹	-۰/۳۸۸۹
AMP+H <sub>2</sub> O (۲۰ wt% AMP)	۱/۱۵۶۹	۰/۲۱۲۰	۰/۱۸۰۸	-۰/۰۴۹۷
DEA+AMP (۲۵ wt% DEA)	۳/۹۴۲۵	-۵/۹۳۹۴	۳/۴۰۶۱	-۰/۱۸۹۵

جدول ۵ - پارامترهای دوتایی معادله ویلسون برای محلول‌های دوجزیی DEA، H<sub>2</sub>O و AMP در بازه دمایی ۳۰۳ K تا ۳۴۳ K

سامانه	a <sub>۱۲</sub> ×۱۰ <sup>۷</sup>	b <sub>۱۲</sub> ×۱۰ <sup>۷</sup>	a <sub>۲۱</sub> ×۱۰ <sup>۷</sup>	b <sub>۲۱</sub> ×۱۰ <sup>۷</sup>
DEA+H <sub>2</sub> O (۲۰ wt% DEA)	-۱/۷۴۴۳	۱/۷۴۶۸	-۰/۳۲۸۲	-۰/۳۲۸۲
AMP+H <sub>2</sub> O (۲۰ wt% AMP)	۱/۱۳۷۱	-۰/۱۸۴۵	-۱/۱۱۲۹	-۰/۳۰۶۸
DEA+AMP (۲۵ wt% DEA)	-۰/۵۱۸۱	۱/۰۰۷۶	-۱/۷۳۴۵	۰/۲۳۹۲



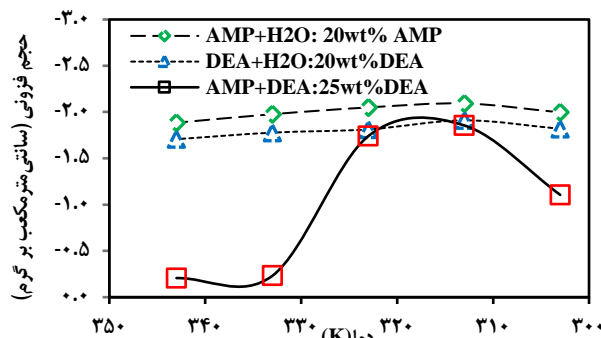
شکل ۴ - بررسی توانایی مدل Eyring-Wilson در پیش‌بینی گرانیوی  
دینامیک ( $\eta$ ) محلول‌های دوجزیبی AMP+H<sub>2</sub>O (20 wt% AMP)،  
AMP+DEA (25 wt% DEA)، DEA+H<sub>2</sub>O (20 wt% DEA)  
و محلول سه جزیبی AMP+DEA+H<sub>2</sub>O

هیدروژنی مقدارهای حجم فزونی به سمت حالت ایده‌آل پیش می‌رود. نتیجه‌های مشابهی را می‌توان از مطالعه‌های پیشین در محلول‌هایی با ساختارهای نزدیک به این‌کار مشاهده کرد [۲۰، ۲۲، ۲۳].

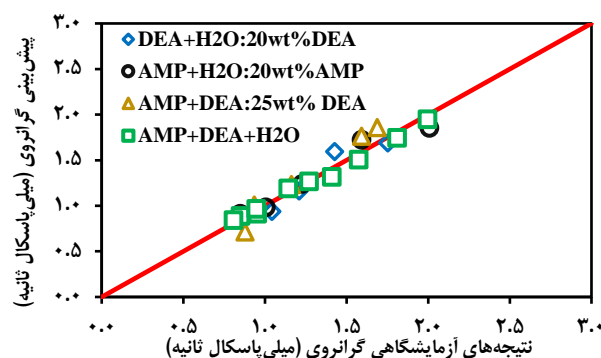
برای بیان انرژی گیس اضافی، فرنچ و کریس ویژگی‌های مولال و قدرت پیوندهای بین مولکولی را تنها عامل‌های موثر در نظر گرفته و نتیجه گرفتند که هرچه تعداد گروه‌های عاملی و قدرت پیوندی آن‌ها بیشتر باشد مقدار  $\frac{g^E}{RT}$  افزایش یافته و سرانجام انحراف از محلول ایده‌آل نیز بیشتر می‌شود [۲۴]. سوال و ایچارد در یافتند که اتصال‌های بین مولکولی تنها عامل موثر در انحراف از محلول ایده‌آل نیست بلکه اندازه مولکول، شکل و ارتباط اجزا به صورت فردی نیز بسیار موثر است [۲۵]. بنابراین انحراف گرانیوی تابع تعامل‌های بین مولکولی، اندازه، شکل و ماهیت مولکول‌هاست.

مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که در غلظت‌های مورد آزمایش، میزان انحراف در پیش‌بینی توسط هر دو مدل مطلوب است و مدل Eyring-Wilson<sup>۱</sup> در مقایسه با مدل Eyring-NRTL<sup>۲</sup> گرانیوی دینامیک را در بازه دمایی ۳۰۳ K تا ۳۴۳ K با دقت بهتری پیش‌بینی کرده است. در کاری همانند /فخمی‌پور و مفرحی نیز به نتیجه‌های همانندی دست پیدا کردند [۳].

با توجه به شکل ۷، مدل Eyring-Wilson تطابق بهتری بین داده‌های آزمایشگاهی و نتیجه‌های به‌دست آمده از مدل‌سازی در دماهای گوناگون نسبت به مدل Eyring-NRTL دارد. جدول ۷ میزان دقت هر یک از مدل‌های ترمودینامیکی در پیش‌بینی ویژگی‌های فزونی (حجم، انرژی گیس، انحراف گرانیوی سینماتیک) سامانه‌های مایع



شکل ۲ - حجم فزونی محلول‌های دوجزیبی AMP+H<sub>2</sub>O (20 wt% AMP)،  
AMP+DEA (25 wt% DEA)، DEA+H<sub>2</sub>O (20 wt% DEA)



شکل ۳ - بررسی توانایی مدل Eyring-NRTL در پیش‌بینی گرانیوی  
دینامیک ( $\eta$ ) محلول‌های دوجزیبی AMP+H<sub>2</sub>O (20 wt% AMP)،  
AMP+DEA، DEA+H<sub>2</sub>O (20 wt% DEA) و محلول سه جزیبی  
AMP+DEA+H<sub>2</sub>O

محلول ایده‌آل می‌شود. نوع آمین بر قدرت پیوند هیدروژنی تأثیرگذار است به عنوان مثال DEA آمین نوع دوم و AMP آمین نوع اول می‌باشد که در نهایت برای DEA پیوند NH...OH و برای AMP، پیوند NH...OH شکل می‌گیرد. همچنین در محلول DEA+AMP به دلیل وجود پیوندهای NH...NH<sub>2</sub> و نیتروژن و نیتروژن که قدرت پیوندی بیشتری نسبت به هیدروژن و اکسیژن دارد و همچنین تعداد پیوندها، میزان انحراف اولیه بیش‌تر بوده است [۲۰] برای مخلوط DEA+AMP اثر افزایشی رفتار تغییر حجم فزونی در دماهای بالاتر با شیب تندتری دیده می‌شود. علت این امر غیرآبی بودن محلول می‌باشد در حالی که در دو محلول AMP+H<sub>2</sub>O و DEA+H<sub>2</sub>O که آب به عنوان حلال و آمین به عنوان حل‌شونده است میزان تغییرهای حجم فزونی نسبت به دما شیب کم‌تری دارد [۲۱].

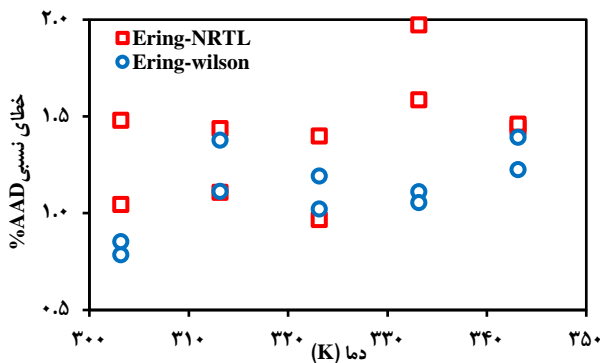
با توجه به شکل ۲، با افزایش دما و شکسته شدن پیوندهای

(۱) Eyring-Wilson model

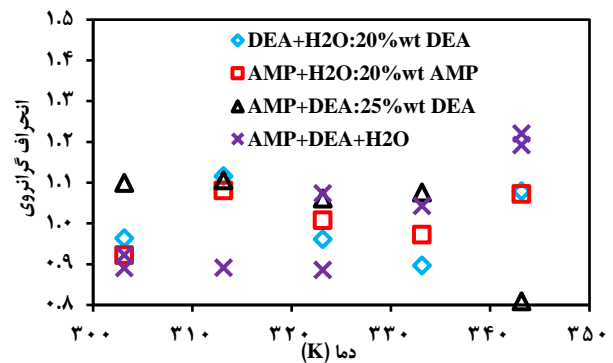
(۲) Eyring-Non-random two liquid model

جدول ۷ - میانگین درصد خطای مدل‌های ترمودینامیکی در پیش‌بینی ویژگی‌های فیزیکی سامانه‌های دوجزیی و سه جزیی

مخلوط حلال	بازه دمایی (K)	تعداد کل نقطه‌ها	مدل			
			ردلیش-کیستر (دانسیته)	NRTL (انرژی گیبس اضافی)	ویلسون (انرژی گیبس اضافی)	ردلیش-کیستر (گرانشی سینماتیک)
DEA+H <sub>2</sub> O (۲۰% wt DEA)	۳۴۳-۳۳۰	۵	۲/۰۴۱۵	۰/۳۳۱۰	۰/۰۳۰۳	۰/۲۲۶۲
AMP+H <sub>2</sub> O (۲۰% wt AMP)	۳۴۳-۳۳۰	۵	۲/۴۰۰۷	۰/۴۱۹۸	۰/۹۷۳۶	۰/۲۶۳۷
DEA+AMP (۲۵ wt% DEA)	۳۴۳-۳۳۰	۵	۱/۶۶۷۵۱	۰/۷۴۸۷	۰/۹۹۴۱۰	۰/۷۱۷۶
DEA+AMP+H <sub>2</sub> O	۳۴۳-۳۳۰	۱۰	۲/۶۶۵۰	۱/۳۸۵۵	۰/۱۰۲۷۱	۰/۲۵۹۷



شکل ۷ - میانگین خطای نسبی پیش‌بینی گرانشی دینامیکی دو مدل Eyring-wilson و Eyring-NRTL برای مخلوط سه جزیی AMP+DEA+H<sub>2</sub>O ۸۰٪ وزنی آب با مجموع ۲۰٪ از نسبت‌های متفاوت AMP و DEA



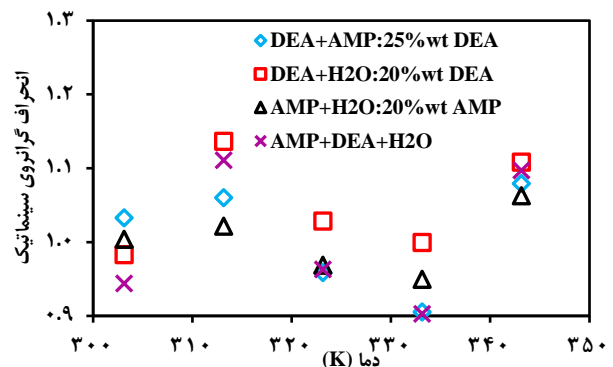
شکل ۵ - میزان انحراف گرانشی دینامیکی ( $\eta^{cal}/\eta^{exp}$ ) آزمایشگاهی برای مخلوط‌های دوجزیی DEA+H<sub>2</sub>O (20% wt DEA)، AMP+DEA (25 wt% DEA)، AMP+H<sub>2</sub>O (20% wt AMP) و سه جزیی AMP+DEA+H<sub>2</sub>O در بازه دمایی ۳۰۳ K تا ۳۴۳ K

انرژی گیبس اضافی، مدل Eyring-Wilson دقت بالاتری نسبت به مدل Eyring-NRTL دارد. همچنین با توجه به نتیجه‌های موجود در این جدول می‌توان دریافت فرض مجموع حسابی انرژی گیبس محلول‌های دوجزیی به عنوان انرژی گیبس اضافی مخلوط سه جزیی سبب کاهش دقت مدل‌ها در تطابق با داده‌های آزمایشگاهی می‌شود که علت این امر تجمیع خطای به‌دست آمده از هر یک مدل‌ها در تعیین انرژی گیبس اضافی محلول‌های دوجزیی می‌باشد.

$$AAD\% = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_i^{Expt} - X_i^{Cal}}{X_i^{Expt}} \right| \quad (18)$$

### نتیجه‌گیری

باتوجه به اهمیت داده‌های آزمایشگاهی دانسیته و گرانشی مخلوط AMP+DEA+H<sub>2</sub>O پیش از بارگذاری CO<sub>2</sub> در بازه دمایی ۳۰۳ K تا ۳۴۳ K تعیین شدند. حجم فزونی محلول‌های دوجزیی DEA+H<sub>2</sub>O، AMP+H<sub>2</sub>O، AMP+DEA و DEA+AMP و مخلوط سه جزیی DEA+AMP+H<sub>2</sub>O با استفاده از مدل ردلیش-کیستر مطابقت داده شده است. نتیجه‌ها



شکل ۶ - میزان انحراف گرانشی سینماتیک ( $\theta^{cal}/\theta^{exp}$ ) آزمایشگاهی برای مخلوط‌های دوجزیی و سه جزیی در بازه دمایی ۳۰۳ K تا ۳۴۳ K

را نشان می‌دهد. با توجه به میزان خطای نسبی (AAD%) معادله (۱۸) کلیه مدل‌ها، می‌توان نتیجه گرفت مدل‌های ترمودینامیکی مورد بررسی در این کار به‌خوبی با داده‌های تجربی مطابقت دارند و رفتار سامانه سه جزیی با داده‌های به‌دست آمده از سامانه دو جزیی قابل پیش‌بینی است. نتیجه‌های جدول ۸ نشان می‌دهد برای پیش‌بینی

	<b>نمادها</b>	
$V_m$	حجم مخلوط	نشان داد با افزایش دما میزان انحراف از محلول ایده‌آل (حجم فزونی) کاهش پیدا می‌نماید. به طور کلی پیوندهای هیدروژنی و برهمکنش‌های بین مولکولی عامل اصلی انحراف از محلول‌های ایده‌آل هستند بنابراین با افزایش دما و کاهش پیوندهای هیدروژنی انحراف منفی (حجم فزونی منفی) به سمت صفر میل می‌کند. می‌توان دید که گرانی و دانسیته هر دو تابع نزولی دما هستند. در تعیین مقدار انرژی گیبس اضافی برای پیش‌بینی گرانی دینامیک از مدل‌های Eyring-Wilson و Eyring-NRTL استفاده شد. انرژی گیبس اضافی به‌دست آمده از مدل ویلسون دقت بهتری در پیش‌بینی ویژگی‌های سه جزئی نشان داد. سرانجام از بسط ردلیش-کیستر برای مدل‌سازی گرانی سینماتیک استفاده شده که قدرت قابل قبولی در پیش‌بینی گرانی و ویژگی‌های سه جزئی نشان داد. تمامی مدل‌ها در پیش‌بینی ویژگی‌های اضافی (حجم، انرژی گیبس، انحراف گرانی سینماتیک) محلول‌های دوجزئی از دقت بالایی برخوردارند اما در پیش‌بینی ویژگی‌های سه جزئی دقت مدل‌ها کاهش می‌یابد که این امر به علت تجمع خطاهای به‌دست آمده برای هر سامانه دو جزئی می‌باشد. با این حال از نتیجه‌های به‌دست آمده در این کار می‌توان به‌خوبی در شبیه‌سازی واحدهای صنعتی مرتبط استفاده نمود.
$A_i$	پارامتر تابع دما دوتایی	
$\rho_m$	دانسیته مخلوط	
$x_i$	کسر مولی جزئی	
$M_i$	جرم مولکولی	
$\mu$	گرانی دینامیک	
$g^E$	انرژی گیبس اضافی	
$R$	ثابت جهانی گازها	
$T$	دما	
$\lambda_{ji}$	پارامتر انرژی متقابل در مدل ویلسون	
$G_{ji}$	پارامتر انرژی متقابل در مدل NRTL	
$\tau_{ji}$	پارامتر انرژی دوجزئی	
$\alpha_{ji}$	فاکتور غیرتصادفی	
$b_{ij}$ و $a_{ji}$	پارامترهای دوتایی	
$\vartheta$	گرانی سینماتیک	

## قدردانی

بدینوسیله از آزمایشگاه مرکزی دانشگاه خلیج فارس برای انجام آزمایش‌های این پژوهش تقدیر به‌عمل می‌آید.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

## مراجع

- [1] Kumar S., Cho J.H., Moon I., **Ionic Liquid-Amine Blends and CO<sub>2</sub> BOLs: Prospective Solvents for Natural Gas Sweetening and CO<sub>2</sub> Capture Technology—A Review**. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **20**: 87-116 (2014).
- [2] Rezaei A., et al., **Densities and Viscosities of Binary and Ternary Solutions of Triethylenetetramine, 2-Amino-2-methyl-1-propanol, and Water for Carbon Dioxide Capture**. *Journal of Chemical & Engineering Data*, **66(8)**: 2942-2958 (2021).
- [3] Afkhamipour M., Mofarahi M., **Experimental Measurement and Modeling Study on CO<sub>2</sub> Equilibrium Solubility, Density and Viscosity for 1-Dimethylamino-2-Propanol (1DMA2P) Solution**. *Fluid Phase Equilibria*, **457**: 38-51 (2018).
- [4] Pellerano M., et al., **CO<sub>2</sub> Capture by Adsorption on Activated Carbons using Pressure Modulation**. *Energy Procedia*, **1(1)**: 647-653 (2009).



- [5] Mokhatab S., Wilkens R., Leontaritis K., [A Review of Strategies for Solving Gas-Hydrate Problems in Subsea Pipelines](#). *Energy Sources, Part A*, **29(1)**: 39-45 (2007).
- [6] Kohl A.L., Nielsen R., ["Gas purification"](#), Gulf Professional Publishing (1997).
- [7] Mores P., Scenna N., Mussati S., [Equilibrium Stage Mathematical Model of the Chemical Absorption of CO<sub>2</sub> into Monoethanolamine \(MEA\) Aqueous Solution](#). *Energy*, **2**: 4 (2010).
- [8] Kamila S. NATRAJ G.D., [Hetero-Molecular Associations in Different Polar and Non-Polar Binary Mixtures](#). *Turkish Journal of Physics*, **36(3)**: 422-429 (2012).
- [9] Pakzad P., et al., [Experimental Data, Thermodynamic and Neural Network Modeling of CO<sub>2</sub> Absorption Capacity for 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol \(AMP\)+ Methanol \(MeOH\)+ H<sub>2</sub>O System](#). *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **73**: 103060 (2020).
- [10] Iloukhani H., Almasi M., [Densities, Viscosities, Excess Molar Volumes, and Refractive Indices of Acetonitrile and 2-Alkanols Binary Mixtures at Different Temperatures: Experimental Results and Application of the Prigogine-Flory-Patterson Theory](#). *Thermochimica Acta*, **495(1)**: 139-148 (2009).
- [11] Hsu C.-H., Li M.-H., [Densities of Aqueous Blended Amines](#). *Journal of Chemical & Engineering Data*, **42(3)**: 502-507 (1997).
- [12] Pikkariainen L., [Densities and Viscosities of Binary Solvent Mixtures of N-Methylacetamide with Aliphatic Alcohols](#). *Journal of Chemical and Engineering Data*, **28(4)**: 381-383 (1983).
- [13] Hsu C.-H., Li M.-H., [Viscosities of Aqueous Blended Amines](#). *Journal of Chemical & Engineering Data*, **42(4)**: 714-720 (1997).
- [14] Henni A., et al., [Volumetric Properties and Viscosities for Aqueous AMP Solutions from 25 C to 70 C](#). *Journal of Chemical & Engineering Data*, **48(3)**: 551-556 (2003).
- [15] Rebolledo-Libreros M.E., Trejo A., [Density and Viscosity of Aqueous Blends of Three Alkanolamines: N-Methyldiethanolamine, Diethanolamine, and 2-Amino-2-methyl-1-propanol in the Range of \(303 to 343\) K](#). *Journal of Chemical & Engineering Data*, **51(2)**: 702-707 (2006).
- [16] Pinto D.D., Svendsen H.F., [An Excess Gibbs Free Energy based Model to Calculate Viscosity of Multicomponent Liquid Mixtures](#). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **42**: 494-501 (2015).
- [17] Desnoyers J., Arel M., [Apparent Molal Volumes of n-Alkylamine Hydrobromides in Water at 25 C: Hydrophobic hydration and Volume changes](#). *Canadian Journal of Chemistry*, **45(4)**: 359-366 (1967).
- [18] Ku S.-C., Peng I.-H., Tu C.-H., [Density and Viscosity of Mixtures of Alkoxypropanols with Ethanol at T=\(298.15, 308.15, and 318.15\) K](#). *Journal of Chemical & Engineering Data*, **46(6)**: 1392-1398 (2001).
- [19] Li M.-H., Lie Y.-C., [Densities and Viscosities of Solutions of Monoethanolamine+ N-Methyldiethanolamine+ Water and Monoethanolamine+ 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol+ Water](#). *Journal of Chemical and Engineering Data*, **39(3)**: 444-447 (1994).

- [20] Nakanishi K., Shirai H., [Studies on Associated Solutions. I. Excess Volume of Binary Systems of Alcohols with Various Organic Liquids](#). *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, **43(6)**: 1634-1642 (1970).
- [21] Mesquita F., et al., [Experimental Density Data and Excess Molar Volumes of Coconut Biodiesel+ n-Hexadecane and Coconut Biodiesel+ Diesel at Different Temperatures](#). *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, **31**: 543-551 (2014).
- [22] Oswal S., H. Desai, [Studies of Viscosity and Excess Molar Volume of Binary Mixtures: 4. 1-Alkanol+ tri-n-Butylamine Mixtures at 303.15 and 313.15 K](#). *Fluid Phase Equilibria*, **204(2)**: 281-294 (2003).
- [23] Patil P., et al., [Density, Excess Molar Volume and Apparent Molar Volume of Binary Liquid Mixtures](#). *Rasayan Journal of Chemistry*, **4(3)**: 599-604 (2011).
- [24] French R.N. Criss C.M., [Group Additivity for the Standard Partial Molal Heat Capacities and Volumes of Polar Compounds in Methanol at 25° C](#). *Journal of Solution Chemistry*, **10(10)**: 699-712 (1981).
- [25] Oswal S., Ijardar S., [Studies of Partial Molar Volumes of Alkylamines in Non-Electrolyte Solvents. IV. Alkyl Amines in Cyclic Ethers at 303.15 K](#). *Journal of Solution Chemistry*, **38(3)**: 321-344 (2009).