

key words

Ionic Liquid
Alkanolamine
Modeling
Viscosity
Friction Theory

Modeling Viscosity of Ionic Liquids and Alkanolamines Mixtures Using Peng-Robinson and Soave-Redlich-Kwang Equation of States with Friction Theory

Marjan Hanifehei, Abolfazl Shojaeian*

Chemical Engineering Department, Hamedan University of Technology,
Hamedan, Iran

Abstract

Research subject: Solvents are compounds that are used in the chemical, pharmacy, oil and gas industries, including in separation processes. These solvents include alkanolamines and ionic liquids (ILs). Ionic liquids with a melting point below 100 °C are a particular class of chemical compounds that have unique properties and characteristics. Design and optimization of acid gases removal systems and CO₂ separation from the gas stream requires experimental data of physical properties. However, performing an experiment is time consuming and costly. Therefore, thermodynamic models are used to predict the properties of pure and mixture materials.

Research approach: In this study, viscosities of 3 alkanolamines (Monoethanolamide (MEA), N-Methyl diethanolamine (MDEA) and Diethanolamine (DEA)) and 12 ionic liquids based on imidazolium (imidazolium based families of tetrafluoroborate, hexafluorophosphate and bis[(trifluoromethyl)sulfonyl]imide) were investigated by the well-known friction theory (FT) based on friction concepts of classical mechanics coupled with two simple cubic equation of state (EoS) of the Soave-Redlich-Kwang (SRK) and Peng-Robinson (PR) at over wide ranges of temperatures and pressure and in different mole fraction (for mixture) for prediction of viscosity. The models presented in this work are based on the viscosity behavior of pure alkanolamines and ionic liquids.

Main results: The result showed that friction theory has a good operation in prediction of viscosity. When PR equation of state was used, the average absolute relative deviations (AARD) were 4.71% and 1.66% for pure ILs and alkanolamine, respectively. Also, using SRK equation of state, these values were 4.70% and 1.99%. For IL-IL mixture, the predicted viscosity values are in good agreement with the experiment, and in the IL-alkanolamine mixtures, the FT-5 and FT-6 show the lowest deviations.

*To whom correspondence should be addressed:
shojaeian@hut.ac.ir

مدل‌سازی گرانشی مخلوط‌های مایعات یونی و آلکانول آمین‌ها با استفاده از معادلات حالت: پنگ-رابینسون (PR) و سوآو-ردلیچ-وانگ (SRK) همراه با نظریه اصطکاک (FT)

مرجان حنیفه‌ئی، ابوالفضل شجاعیان*

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: حلال‌ها ترکیباتی هستند که در صنایع شیمیایی، دارویی، نفت و گاز از جمله در فرایندهای جداسازی کاربرد دارند. آلکانول آمین‌ها و مایعات یونی از جمله این حلال‌ها هستند. مایعات یونی با نقطه ذوب زیر 100°C دسته جدیدی از ترکیبات شیمیایی هستند که خواص و ویژگی‌های منحصر به فردی دارند. طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های حذف گازهای اسیدی از گاز طبیعی و همچنین جداسازی گاز دی‌اکسید کربن از جریان مخلوط گازها از جمله گاز دودکش، نیازمند داده‌های آزمایشگاهی مربوط به خواص فیزیکی حلال است. با این حال، انجام اغلب آزمایش‌ها وقت‌گیر و پرهزینه است. بنابراین، از مدل‌های ترمودینامیکی برای پیش‌بینی خواص سامانه‌های خالص و مخلوط استفاده می‌شود.

روش تحقیق: در این مطالعه گرانشی ۳ آلکانول آمین (مونواتانول آمین، متیل‌دی‌اتانول آمین و دی‌اتانول آمین) و ۱۲ مایع یونی بر پایه ایمیدازولیوم (تترافلورابورات، هگزا فلور افسفات و بیس‌تری‌فلورومتیل سولفونیل آمید) توسط نظریه اصطکاک (FT) که بر اساس مفاهیم اصطکاک مکانیک کلاسیک می‌باشد همراه با معادلات حالت پنگ-رابینسون (PR) و سوآو-ردلیچ-وانگ (SRK) در محدوده وسیع دمایی و فشاری مورد بررسی قرار گرفت سپس با استفاده از داده‌های به دست آمده در قسمت قبل، گرانشی مخلوط‌های مختلف مایع یونی-مایع یونی و مایع یونی-آلکانول آمین‌ها در شرایط غلظتی و دمایی مختلف مدل‌سازی شد.

نتایج اصلی: نتایج حاصل از این مدل‌سازی نشان داد که نظریه اصطکاک در پیش‌بینی گرانشی مواد خالص عملکرد خوبی داشته است و مقدار انحراف نسبی میانگین مطلق (AARD%) با استفاده از معادله حالت پنگ-رابینسون برای مایعات یونی خالص و آلکانول آمین‌ها به ترتیب $4/71\%$ و $1/66\%$ است. در معادله حالت سوآو-ردلیچ-وانگ این مقادیر $4/70\%$ و $1/99\%$ است. در مخلوط‌های مایع یونی-مایع یونی مقادیر گرانشی پیش‌بینی شده با مقادیر تجربی تطابق خوبی داشته و در مورد مخلوط‌های مایع یونی-آلکانول آمین، نظریه اصطکاک ۵ و ۶ پارامتری کم‌ترین میزان خطا را نشان می‌دهد.

فصلنامه علمی - پژوهشی بین رشته‌ای
سال پنجم، شماره ۴، نسخه ۱
زمستان ۱۴۰۰، صفحه ۵۴-۳۹

کلمات کلیدی

مایعات یونی

آلکانول آمین‌ها

مدل‌سازی

گرانشی

نظریه اصطکاک

*مسئول مکاتبات:

shojaeian@hut.ac.ir

۱ مقدمه

در این زمینه در سال ۲۰۱۰ ژائو و همکاران [۴] سرعت و میزان جذب گاز CO_۲ را با محلول‌های آب+آلکانول آمین+مایع یونی، آب+مایع یونی و آب+آلکانول آمین مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که در میان آلکانول آمین‌ها، متیل‌دی‌اتانول آمین (MDEA) به دلیل هدر رفت پایین مناسب‌ترین گزینه است و از میان تعداد اجزای محلول، محلول آب+مایع یونی+آلکانول آمین میزان جذب بالاتری دارد. یکی از اثرات مثبت ترکیب مایعات یونی با آلکانول آمین در این است که هنگام عمل جذب CO_۲ سرعت جذب بالاتر از زمانی است که از آلکانول آمین خالص استفاده می‌شود در این زمینه احمدی و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۰ طی آزمایش‌هایی سرعت جذب اولیه و حلالیت CO_۲ را در محلول آب+MDEA با غلظت‌های مختلف مایع یونی ۱-بوتیل-۳-متیل ایمیدازولیوم ([BMIM][BF_۴]) در فشارهای زیر ۱۱۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که غلظت کمی از [BMIM][BF_۴] در محلول ۴ مولار MDEA اثر قابل توجهی بر میزان جذب نهایی ندارد اما سرعت اولیه جذب را افزایش می‌دهد. همچنین غلظت بالای مایع یونی باعث کاهش ظرفیت جذب CO_۲ شده است به همین علت با تنظیم غلظت مایع یونی می‌توان به محلولی با قدرت و سرعت جذب بالا دست یافت. همان‌طور که در بالا گفته شد برای استفاده از حلال در صنعت نیازمند خواص فیزیکی مانند چگالی و گرانروی هستیم. یکی از راه‌های دستیابی به این خواص استفاده از معادلات مناسب جهت تخمین این خواص است. لذا در این مطالعه با استفاده از مقادیر تجربی گرانروی که از منابع استخراج شده و اطلاعات آن‌ها در جدول ۱ و ۲ آورده شده است، با استفاده از معادلات حالت پنگ-رابینسون (PR) و سوو-ردلیچ-وانگ (SRK) و مدل نظریه اصطکاک (FT) به بررسی چگالی و درنهایت گرانروی ۱۲ مایعات یونی و ۳ آلکانول آمین خالص و مخلوط‌های مختلف مایع یونی-مایع یونی (۲ سامانه) و مایع یونی-آلکانول آمین (۷ سامانه) پرداخته‌ایم.

نظریه مدل‌سازی

پیش‌بینی گرانروی مایعات یونی و آلکانول آمین‌ها در این مطالعه با کمک معادله کاینانس کیسنروس و همکاران [۶] انجام می‌شود. این معادله شامل دو عبارت مربوط به گاز رقیق و عبارت حالت متراکم است:

$$\eta = \eta_0 + \Delta\eta \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، η_0 گرانروی گاز رقیق است که اثرات بین‌مولکولی نادیده گرفته می‌شود و $\Delta\eta$ عبارت باقی‌مانده گرانروی است.

در حال حاضر سوخت فسیلی مهم‌ترین منبع انرژی جهان است که منبع اصلی تولید گاز گلخانه‌ای است. از روش‌های رایج برای جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای جذب آن‌ها توسط حلال‌ها است. از این‌رو طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های حذف گازهای اسیدی از گاز طبیعی و همچنین جداسازی گاز دی‌اکسید کربن از جریان مخلوط گازها از جمله گاز دودکش نیازمند خواص فیزیکی مانند چگالی و گرانروی حلال‌ها است. از جمله این حلال‌ها که در صنعت به کار می‌رود آلکانول آمین‌ها است. عملکرد آلکانول آمین‌ها در جذب هیدروژن سولفید و دی‌اکسید کربن اولین بار توسط باتومز [۱] آزمایش شد. مهم‌ترین ویژگی این حلال جذب و بازده بالا و همچنین بازیابی آن است. اما به دلیل برخی از مشکلات آمین مانند فشار بخار بالا، آلودگی آمین و تشکیل کف و خوردگی، باعث شده است محققین به دنبال حلال‌های جدیدی برای جذب SO_۲ و CO_۲ باشند. مایعات یونی به عنوان یکی از حلال‌های غیرفرار است که به علت فشار بخار پایین، شمیمیدان‌ها آن‌ها را جزء حلال‌های سبز دسته‌بندی می‌کنند. مایعات یونی به صورت شبکه سه‌بعدی از کاتیون‌های آلی و آنیون‌های آلی یا معدنی هستند که با نیروهای نظیر پیوندهای هیدروژنی و نیروی الکترواستاتیک به هم متصل می‌شوند. مهم‌ترین ویژگی کاتیون این ترکیبات تقارن کم و تمرکز ضعیف بار مثبت است که مانع از تشکیل شبکه بلوری منظم و در نتیجه کاهش نقطه ذوب نمک به وجود آمده می‌شود. این موضوع باعث فراهم شدن محیط غیرآبی در دمای پایین و در نتیجه امکان انجام واکنش‌های متعدد در آن‌ها می‌شود. همچنین با تغییر نوع کاتیون و یا آنیون خواص آن‌ها قابل تغییر و تنظیم است، از این رو به مایعات یونی حلال طراحی نیز می‌گویند. مایعات یونی اولین بار با سنتز اتیل‌آمونومیترات توسط والسدن [۲] در سال ۱۹۱۴ شناخته شدند که حاصل واکنش بین اتیل آمین با اسیدنیتریک غلیظ است. این مایعات به دلیل خواص منحصر به فردی که دارند و همچنین امکان بازیابی کامل و جذب گازهای اسیدی بدون ایجاد آلاینده و خوردگی جایگزین مناسبی برای آمین‌ها هستند. رابت سینگر [۳] یکی از محققانی بود که بر روی توانایی مایعات یونی برای جذب ترکیبات گوگردی از گاز طبیعی ترش مطالعاتی را انجام داد. هدف اصلی او توسعه مایعات یونی برای جداسازی ترکیبات گوگردی از گاز ترش، بازیافت مایعات یونی برای استفاده مجدد و گسترش این روش برای تصفیه دیگر فراورده‌های نفتی بود. یکی از راه‌های استفاده از مایعات یونی در جذب گازهای اسیدی، اختلاط آن با آلکانول آمین‌ها است.

جدول ۱ اطلاعات و خواص بحرانی مایعات یونی و آلکانول آمین های خالص مورد استفاده در این کار
Table -1 Details and critical properties of pure ionic liquids and alkanolamines used in this work

Material	M_w (g/mol)	Tc(K)	Pc(MPa)	w	P_{min} - P_{max} (MPa)	T_{min} - T_{max} (K)	NP*	Ref
[emim][BF ₄]	198	585.3	2.36	0.7685	14.5-0.1	323.75-282.55	54	[14]
[bmim][BF ₄]	226	632.3	2.04	0.8489	300-0.1	353.15-273.15	82	[16],[15]
[hmim][BF ₄]	254.1	679.1	1.79	0.9258	121.81-0.1	343.15-298.15	33	[17]
[bmim][PF ₆]	284.2	708.9	1.73	0.7553	249.3-0.1	353.15-273.15	93	[18],[15]
[hmim][TF ₂ N]	447.4	1287.3	2.39	0.3359	124-0.1	343.15-298.15	33	[17]
[emim][TF ₂ N]	391.3	1244.9	3.26	0.1818	122.43-0.1	343.15-298.15	33	[17]
[bmim][TF ₂ N]	419.4	1265.0	2.76	0.2656	298.9-0.1	353.15-273.15	65	[19]
[omim][BF ₄]	282.1	726.1	1.60	0.9954	224.2-0.1	353.15-273.15	81	[20]
[hmim][PF ₆]	312.2	754.3	1.55	0.8352	238.5-0.1	353.15-273.15	108	[17],[19],[21]
[omim][PF ₆]	340.3	800.1	1.40	0.9069	175.9-0.1	353.15-273.15	76	[20],[21]
[emim][ac]	170.2	807.1	2.92	0.5889	0.101	353.15-293.15	7	[28]
[bmim][ac]	198.3	847.3	2.45	0.6681	0.101325	363.15-283.15	17	[29]
MEA	61.1	672.2	7.99	0.5557	0.101	387.43-288.15	27	[29]
MDEA	119.2	741.9	4.17	0.6150	0.101	388.23-288	27	[29],[28]
DEA	105.1	736.5	4.93	1.0158	0.101	399.73-303.13	35	[29],[28]
Total							414	

* NP is number of experimental data.

جدول ۲ مشخصات مخلوط‌های دوتایی مایع یونی و آلکانول آمین مورد بررسی در این کار
Table -2 Properties of binary mixtures of ionic liquids and alkanolamines studied in this work

Mixture	$T_{min} - T_{max}$ (K)	NP*	Ref
[emim][BF ₄]+[hmim][BF ₄]	343.15-293.15	121	[22]
[bmim][PF ₆]+[bmim][BF ₄]	308.15-298.15	135	[23]
MDEA+[hmim][Tf ₂ N]	323.15-303.15	55	[24]
MDEA+[hmim][BF ₄]	323.15-303.15	55	[25]
MDEA+[bmim][ac]	353.15-293.15	42	[26]
MEA+[bmim][BF ₄]	333.15-293.15	55	[27]
DEA+[bmim][ac]	353.15-293.15	41	[26]
MDEA+[emim][ac]	353.15-293.15	42	[28]
DEA+[emim][ac]	353.15-293.15	41	[28]
Total		873	

* NP is number of experimental data.

تنش برشی متناسب فشار دافعه و جاذبه سامانه اس. از سوی دیگر با توجه به قانون گرانیوی نیوتن تنش برشی مناسب با گرانیوی است [۶]. در نتیجه

$$\Delta\eta = k_r P_r + k_a P_a + k_{rr} P_r^2 + k_{aa} P_a^2 \quad (7)$$

که P_r و P_a به ترتیب فشار دافعه و جاذبه هستند که توسط معادلات حالت پیش‌بینی می‌شوند. k_r , k_a , k_{aa} , k_{rr} ضرایب اصطکاک وابسته به دما هستند که برای بیشتر مایعات به صورت تابع نمایی بیان می‌شود. علاوه بر این برای مایعات گرانیوی مانند مایعات یونی فاصله بین مولکولی در حرکت لایه‌ها روی هم کم است. در نتیجه قدرت نیروی دافعه بیشتر می‌شود از این روی می‌توان از جمله دوم مربوط به نیروی جاذبه صرف نظر کرد. بنابراین داریم.

$$\Delta\eta = k_r P_r + k_a P_a + k_{rr} P_r^2 \quad (8)$$

در این کار برای ضرایب اصطکاک به چهار حالت ممکن می‌پردازیم.

حالت اول (FT5): پیوندی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۵ از نظریه اصطکاک ۵ پارامتری برای تخمین گرانیوی مایعات یونی با استفاده از معادلات حالت SAFT استفاده کردند. در این مطالعه نیز از این حالت نظریه اصطکاک همراه با معادله حالت‌های ساده‌تر استفاده می‌شود.

$$k_r = a_1 \exp(\Gamma - 1) + a_2 (\exp(2(\Gamma - 1)) - 1) \quad (9)$$

$$k_a = b_1 \exp(\Gamma - 1) + b_2 (\exp(2(\Gamma - 1)) - 1) \quad (10)$$

η_0 طبق تعریف چانگ تابعی از حجم بحرانی، دما و انتگرال برخورد کاهش یافته مطابق روابط زیر است:

$$\eta_0 = 40.785 + 10^{-2} \frac{\sqrt{M_w T}}{V_c^{2/3} \Omega^* T^*} F_c \quad (2)$$

$$\Omega^* = \frac{1.16145}{T^{*0.14874}} + \frac{0.52487}{\exp(0.77320T^*)} + \frac{2.16178}{\exp(2.43787T^*)} - 6.435 \times 10^{-4} (T^*)^{0.14874} \sin(18.0323(T^*)^{-0.76830} - 7.2737) \quad (3)$$

که در روابط (۲) و (۳) $T^* = 1.2593 T_r$ و T_r دمای کاهش یافته است و F_c در رابطه (۲) ضریب اصلاح است که از رابطه تجربی زیر حاصل می‌شود:

$$F_c = 1 - 0.2756\omega + 0.059035\mu_r^4 - k \quad (4)$$

در رابطه (۴) ω ضریب بی‌مرکزی، μ_r ممان دوقطبی بدون بعد و k پارامتری برای بیان اثر پیوند هیدروژنی در مواد تجمعی هستند.

$$k = 0.0682 + 0.276659 \left(\frac{17N_{OH}}{M_w} \right) \quad (5)$$

$$\mu_r = 131.3 \frac{\mu}{(V_c T_c)^{0.5}} \quad (6)$$

در این مطالعه به دلیل کوچک بودن گرانیوی گاز نسبت به مایعات، از گرانیوی گازها صرف نظر کرده‌ایم و عبارت دوم مربوط به گرانیوی باقیمانده اس که بر اساس تنش برشی بین دو سطح سیال پیش‌بینی می‌شود. قوانین اصطکاک نشان می‌دهد که تنش برشی متناسب با نیروهای نرمال بر روی سطوح است. به عبارت دیگر

$$k_r = a_1 \exp(\Gamma - 1) + a_2(\exp(2(\Gamma - 1)) - 1) + a_3(\exp(3(\Gamma - 1)) - 1) \quad (19)$$

$$k_a = b_1 \exp(\Gamma - 1) + b_2(\exp(2(\Gamma - 1)) - 1) + b_3(\exp(3(\Gamma - 1)) - 1) \quad (20)$$

$$k_{rr} = c_2(\exp(2\Gamma) - 1) + c_3(\exp(3\Gamma) - 1) \quad (21)$$

حالت چهارم (FT9): همچنین در این مطالعه علاوه بر دو حالت نظریه اصطکاک حالت ۹ پارامتری نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰].

$$k_r = (a_0 + a_1\Psi_1 + a_2\Psi_2) \cdot \Gamma \quad (22)$$

$$k_a = (b_0 + b_1\Psi_1 + b_2\Psi_2) \cdot \Gamma \quad (23)$$

$$k_{rr} = (c_0 + c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2) \cdot \Gamma^3 \quad (24)$$

$$\Psi_1 = \exp(\Gamma) - 1, \Psi_2 = \exp(\Gamma^2) - 1 \quad (25)$$

به دلیل پیوستگی بین مولکولی که بین مایعات وجود دارد می‌توان در حالت دیگر فشار جاذبه و دافعه را با کمک قوانین ترمودینامیکی، از مشتق فشار همانند روابط زیر محاسبه و استفاده کرد که این روش مناسب‌تر است [۱۱].

$$P_a = -\pi_T = T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V_m} - P \quad (26)$$

$$P_{a,PR} = \frac{\left(\frac{da}{dT} \right) \cdot T - a}{V_m^2 + 2V_m b - b^2} \quad (27)$$

$$P_{a,SRK} = \frac{\left(\frac{da}{dT} \right) \cdot T - a}{V_m^2 + V_m b} \quad (28)$$

$$P_r = P - P_a \quad (29)$$

در نهایت با استفاده از معادله حالت‌های PR و SRK عملکرد نظریه اصطکاک برای ۱۲ مایع یونی و ۳ آلکانول آمین در ۱۶ حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

برای پیش‌بینی گرانیوی مخلوط مایعات یونی و آلکانول آمین‌ها نیز ابتدا باید چگالی آن‌ها را به دست آورد. بدین ترتیب با استفاده از قوانین اختلاط و معادله

$$k_{rr} = c_2(\exp(4\Gamma) - 1) \quad (11)$$

حالت دوم (FT6): ضرایب اصطکاک ۶ پارامتری که در سال ۲۰۰۲ توسط کویونوس و همکارانش [۶] به صورت زیر بیان شده‌اند.

$$k_r = a_1\Psi_1 + a_2\Psi_2 \quad (12)$$

$$k_a = b_1\Psi_1 + b_2\Psi_2 \quad (13)$$

$$k_{rr} = c_2\Psi_2 + c_3\Psi_3 \quad (14)$$

$$\Psi_i = \exp(2^i \cdot \Gamma), i = 1, 2, 3, \Gamma = \frac{T_c}{T} \quad (15)$$

ضرایب $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_2, c_3$ پارامترهای تنظیمی در این کار است. با قرار دادن روابط (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) در رابطه (۸) و استفاده از معادلات PR و SRK خواهیم داشت [۹].

$$\Delta\eta = \sum_{i=1}^2 a_i \exp(2^i \Gamma) \cdot \frac{RT}{(v-b)} - \sum_{i=1}^2 b_i \exp(2^i \Gamma) \cdot \frac{a}{(v+\delta_1 b)(v+\delta_2 b)} + \sum_{i=2}^3 c_i \exp(2^i \Gamma) \cdot \frac{R^2 T^2}{(v-b)^2} \quad (16)$$

$\delta_1 = 1, \delta_2 = 0$ برای معادله حالت SRK و $\delta_1 = 1 - 2^{1/2}, \delta_2 = 1 - 2^{1/2}$ برای PR است. که ضریب a تابعیتی از دما، ضریب بی‌مرکزی، دما و فشار بحرانی دارد و ضریب b تابعیتی از دما و فشار بحرانی دارد:

$$a_i = \Omega_a \frac{R^2 T_{ci}^2}{P_{ci}} \times \alpha(T), \quad \begin{cases} \alpha(T) = \left[1 + m \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_{ci}}} \right) \right]^2 \\ m = m_0 + m_1 \omega_i + m_2 \omega_i^2 \end{cases} \quad (17)$$

$$b = \frac{\Omega_b R T_{ci}}{P_{ci}} \quad (18)$$

مقادیر ثابت $\Omega_a, \Omega_b, m_0, m_1, m_2$ برای هر یک از معادلات حالت در جدول ۳ آورده شده است.

حالت سوم (FT8): استفاده از معادلات حالت ساده مانند PR و SRK می‌توانند در صرفه‌جویی زمان و انرژی، مفید باشد از این رو استفاده از حالات دیگر نظریه اصطکاک می‌تواند در رسیدن به بازده بالاتر کمک کند. در این زمینه کویونوس کیسنروز و همکاران [۹] نظریه اصطکاک ۸ پارامتری را پیشنهاد داده‌اند.

جدول ۳ مقادیر ثابت معادلات حالت PR و SRK
Table -3 Fixed values of SRK & PR EoS

	Ω_a	Ω_b	m_0	m_1	m_2
SRK	0.42748	0.086640	0.48000	1.57400	-0.17400
PR	0.45740	0.077796	0.37464	1.54226	-0.26992

حالت به بررسی آن پرداخته‌ایم.

با در نظر گرفتن اثر متقابل مولکول‌ها قوانین اختلاط زیر برای ثوابت a و b پیشنهاد شده است [۱۲]:

$$a = \sum_i \sum_j x_i x_j a_{ij} \quad (30)$$

$$b = \sum_i \sum_j x_i x_j b_{ij} \quad (31)$$

که a_{ii} و b_{ii} پارامترهای اجزا خالص و a_{ij} و b_{ij} مربوط به همبستگی مولکولی هستند و از رابطه زیر به دست می‌آیند.

$$a_{ij} = \sqrt{a_i a_j} \quad (32)$$

$$b_{ij} = \frac{b_{ii} + b_{jj}}{2} \quad (33)$$

همچنین قوانین اختلاط برای نظریه اصطکاک به صورت زیر بیان شد [۱۳]:

$$k_{r,mix} = [\sum_{i=1}^n z_i k_{r,i}] (1 - d_{11}) \quad (34)$$

$$k_{a,mix} = [\sum_{i=1}^n z_i k_{a,i}] (1 - d_{12}) \quad (35)$$

$$k_{rr,mix} = [\sum_{i=1}^n z_i k_{rr,i}] (1 - d_{13}) \quad (36)$$

در روابط بالا d_{11} ، d_{12} و d_{13} پارامترهای تنظیمی در تخمین ضرایب گرانیوی مخلوط و زیرنویس i نشان‌دهنده اجزای خالص است. z_i کسر جرمی جزء i است که به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$z_i = \frac{x_i}{M_{w,i}^E MM} \quad (37)$$

$$MM = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{M_{w,i}^E} \quad (38)$$

که در آن x_i کسر مولی، M_w جرم مولکولی است و E پارامتر انرژی است که در این مطالعه به‌عنوان پارامتر تنظیمی به کار رفته است.

۳ نتایج و بحث

در این مطالعه، چهار حالت مختلف نظریه اصطکاک با معادله حالت‌های مکعبی SRK و PR برای پیش‌بینی گرانیوی سه خانواده از مایعات یونی $[C_xmim][BF_4]$ ، $[C_xmim][PF_6]$ و $[C_xmim][Tf_2N]$ و آلکانول‌آمین‌های MEA، MDEA و DEA و مخلوط این دو گروه همراه شده‌اند. بعد از پیش‌بینی چگالی، با کمک حالت‌های مختلف نظریه اصطکاک گرانیوی ترکیبات محاسبه شده است و در نهایت نتایج حاصل با نتایج دو تحقیق

پیشین مقایسه شده است.

برای ارزیابی توانایی ۴ حالت از نظریه اصطکاک در برازش گرانیوی و تعیین میزان انحراف مقادیر حاصل‌شده از مدل‌سازی با مقادیر موجود در منابع (مقادیر گرانیوی تجربی) از رابطه زیر استفاده شده است.

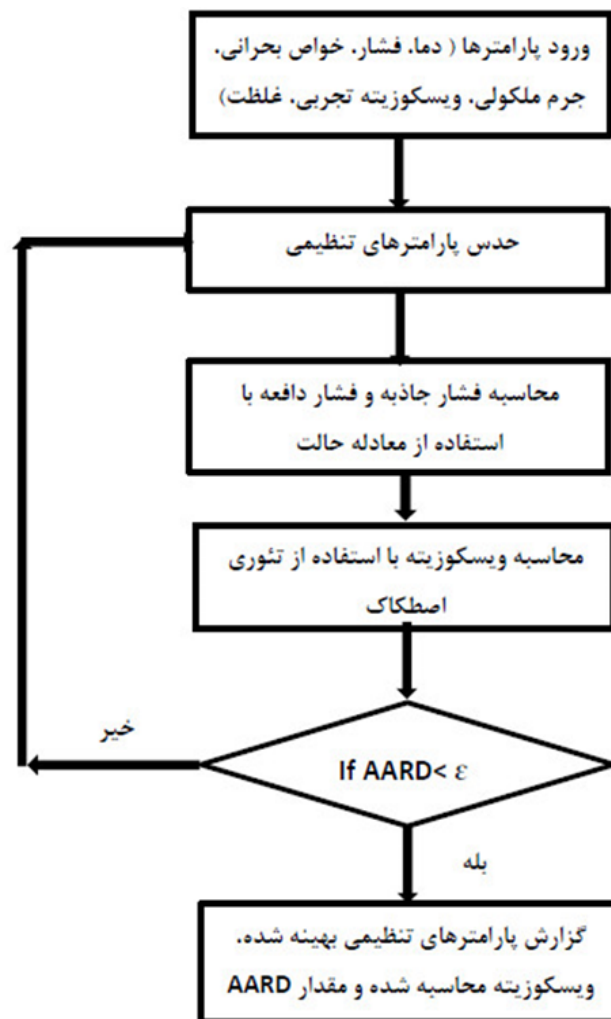
$$AARD\% = \sum_i \frac{1}{n} \left| \frac{Y_{exp} - Y_{lit}}{Y_{exp}} \right| * 100 \quad Y = \eta \quad (39)$$

n تعداد داده‌های تجربی و اندیس‌های exp و lit به ترتیب داده‌های تجربی و مقادیر به دست آمده از مدل است. همچنین جهت به دست آوردن پارامترهای بهینه معادلات نظریه اصطکاک در حالت خالص و مخلوط‌های دو جزئی از تابع هدف به صورت معادله ۳۹ استفاده شده است. برای بیان منسجم‌تر روند بهینه‌سازی پارامترهای مدل فلوجارت محاسباتی گرانیوی به صورت شکل ۱ ارائه شده است. همچنین تمام پارامترهای بهینه‌سازی شده به دست آمده مدل نظریه اصطکاک در حالات مختلف در پیوست مقاله داده شده است.

جدول ۴ نتایج مربوط به مایعات یونی در حالت خالص است. این جدول نشان می‌دهد که رویکرد FT۹-SRK و زمانی که از فرم معادله ۱۶ معادله حالت استفاده می‌شود کم‌ترین خطا (AARD%=۱/۸۴) را در بین سایر حالت‌ها نشان می‌دهد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده، رویکرد FT۶-SRK همراه با معادله ۱۶، با توجه به اینکه تعداد پارامترهای تنظیمی کمتری دارد اما از دقت بالاتری نسبت به رویکرد FTA-SRK داشته است. در مورد FT۵ می‌توان گفت هر دو رویکرد FT۵-SRK و FT۵-PR، هرگاه از فشار مشتقی استفاده شده، نتایج بهتر بوده است. علاوه بر این بهترین نتیجه به دست آمده در این تحقیق با نتایج ارائه‌شده توسط حق بخش و همکاران [۳۰] و شن و همکاران در [۳۱] جدول ۵ با یکدیگر مقایسه شده است. حق بخش و همکاران [۳۰] از معادلات حالت پیچیده CPA، PC-SAFT و شن و همکاران [۳۱] از معادله حالت ePC-SAFT برای محاسبه چگالی فاز مایع استفاده کرده‌اند و هر دو از نظریه اصطکاک ۱۲ پارامتری استفاده کرده‌اند که دارای ۳ پارامتر بیشتر نسبت به بهترین مدل به دست آمده در این تحقیق است. مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق که از حالت ۹ پارامتری نظریه اصطکاک به همراه معادله حالت ساده SRK استفاده شده است در مقایسه با مدل‌های استفاده‌شده توسط حق بخش و همکاران [۳۰] و شن و همکاران [۳۱] با توجه به معادله ساده‌تر و تعداد پارامترهای کمتر قابل قبول است. همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است تمامی حالت‌های نظریه اصطکاک در پیش‌بینی گرانیوی آلکانول‌آمین‌ها موفق عمل کرده است. البته رویکرد FT۶-PR بهترین نتایج را با تعداد پارامترهای تنظیمی کمتر داشته است

مستقیم داشته و بیشترین گرانیوی در بالاترین فشار اتفاق افتاده است. همچنین شیب نمودارها نشان می‌دهند که افزایش جرم مولکولی ترکیب در بازه زمانی کوچک، تغییرات گرانیوی بیشتر بوده است.

و مقدار خطای آن ۰/۴۷٪ است. این نتیجه با توجه به شکل ۲ نیز نمایان است. به طوری که اختلاف مقادیر تجربی گرانیوی مایعات یونی $[BF_4][C_{x,mim}]$ با مقادیر محاسبه شده بسیار کم است. علاوه بر این با توجه به شکل ۲ می‌توان دریافت که گرانیوی با فشار رابطه



شکل ۱ الگوریتم محاسبه گرانیوی
Figure 1. Algorithm of viscosity calculation

جدول ۴ نتایج خطای گرانیروی مایعات یونی خالص با استفاده از مدل های FT-PR و FT-SRK
 Table-4 Results of viscosity deviations for pure IL using the FT-PR and FT-SRK version models

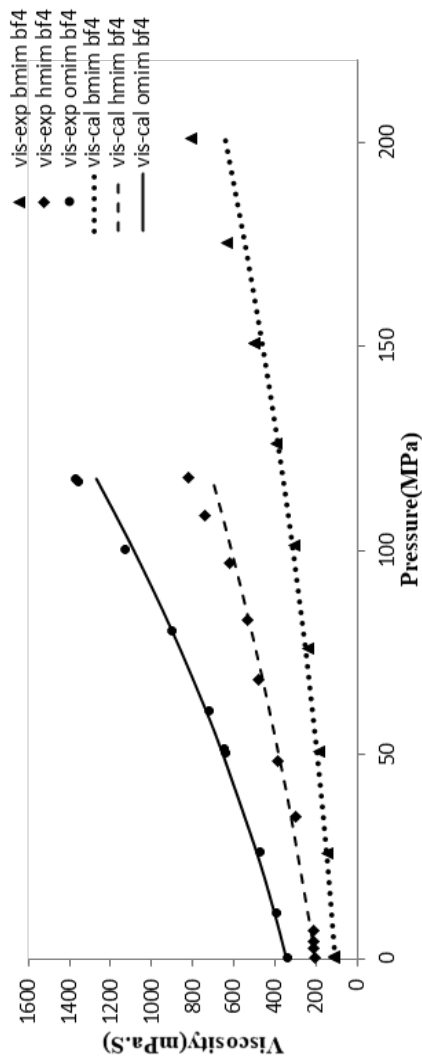
IL	PR-Eq. 16					SRK-Eq. 16					PR-Eq. 27					SRK-Eq. 28				
	FT5	FT6	FT8	FT9	FT9	FT5	FT6	FT8	FT9	FT9	FT5	FT6	FT8	FT9	FT9	FT5	FT6	FT8	FT9	FT9
[emim] [BF ₄]	0.82	0.54	3.80	0.43	0.43	0.85	0.51	1.71	0.43	0.43	1.05	0.50	0.63	0.70	1.30	0.51	0.68	0.44	0.44	
[bmim] [BF ₄]	9.45	4.95	8.17	2.72	2.72	10.49	5.52	6.39	2.59	2.59	15.74	3.93	6.62	4.16	16.97	3.54	6.14	4.36	4.36	
[hmim] [BF ₄]	6.90	4.82	3.94	1.05	1.04	7.57	4.67	2.94	1.04	1.04	11.32	2.87	1.90	3.21	12.81	2.45	1.85	6.87	6.87	
[bmim] [PF ₆]	8.09	5.27	6.63	2.76	2.66	8.75	5.69	6.98	2.66	2.66	12.20	4.79	6.32	2.71	14.07	3.98	6.13	3.30	3.30	
[hmim] [Tf ₂ N]	4.46	1.00	1.05	0.58	0.56	3.72	1.01	1.22	0.56	0.56	4.72	0.79	4.98	0.92	2.88	1.04	0.90	0.95	0.95	
[emim] [ac]	3.34	0.63	2.37	0.8	0.97	3.35	0.72	3.28	0.97	0.97	3.19	0.58	2.52	0.92	3.21	0.54	2.55	0.91	0.91	
[bmim] [ac]	8.29	1.80	3.59	2.03	2.03	8.30	1.92	8.24	0.92	0.92	7.97	0.96	3.00	1.88	2.78	1.75	1.14	1.58	1.58	
[emim] [Tf ₂ N]	9.00	2.97	1.39	1.30	1.05	7.86	2.97	1.29	1.05	1.05	8.48	2.60	1.06	1.24	4.27	2.53	1.47	4.63	4.63	
[bmim] [Tf ₂ N]	8.11	1.76	2.15	3.08	2.71	7.26	1.87	1.99	2.71	2.71	8.19	1.65	1.90	2.88	7.13	1.71	2.84	3.30	3.30	
[omim] [BF ₄]	9.20	4.90	6.38	1.41	1.37	10.09	3.47	6.49	1.37	1.37	14.58	2.52	6.59	3.03	0.19	2.21	0.99	2.97	2.97	
[hmim] [PF ₆]	8.52	4.62	7.18	2.50	2.54	9.76	4.65	6.80	2.54	2.54	14.00	3.09	6.51	3.20	2.73	2.86	1.07	2.95	2.95	
[omim] [PF ₆]	7.62	2.97	7.61	1.23	1.27	8.53	2.66	7.57	1.27	1.27	12.68	1.60	7.03	2.76	7.99	1.50	7.45	1.92	1.92	
Average	7.64	3.68	5.59	1.94	1.84	8.12	3.61	5.26	1.84	1.84	11.28	2.64	4.99	2.71	12.22	2.42	4.82	3.03	3.03	

جدول ۵ مقایسه نتایج حاصل از این کار (مدل FT9-SRK) با کارهای دیگر [۳۰ و ۳۱]
 Table 5: Comparison of the results of this work (FT9-SRK) with other works [30,31]

	SRK-Eq. 16	CPA [30]	PC-SAFT [30]	ePC-SAFT [31]
IL	FT9	FT12 [30]	FT12 [30]	FT12 [31]
[emim] [BF₄]	0.43	0.73	0.74	-
[bmim] [BF₄]	2.59	3.45	2.70	2.41
[hmim] [BF₄]	1.04	1.88	1.38	1.05
[bmim] [PF₆]	2.66	5.83	5.66	1.87
[hmim] [Tf₂N]	0.56	1.26	0.84	0.47
[emim] [ac]	0.97	-	-	-
[bmim] [ac]	0.92	-	-	-
[emim] [Tf₂N]	1.05	2.10	1.49	0.58
[bmim] [Tf₂N]	2.71	1.59	0.64	0.79
[omim] [BF₄]	1.37	-	-	-
[hmim] [PF₆]	2.54	5.19	4.33	1.79
[omim] [PF₆]	1.27	6.04	3.51	1.17
Average	1.84	3.12	2.37	1.48

جدول ۶ نتایج خطای آلکانول آمین‌های خالص با استفاده از مدل‌های FT-SRK و FT-PR
 Table-6 Results of deviations of pure Alkanolamines using the FT-PR and FT-SRK models

	PR-Eq. 16			SRK-Eq. 16			PR-Eq. 27			SRK-Eq. 28		
	FT5	FT6	FT9	FT5	FT6	FT9	FT5	FT6	FT9	FT5	FT6	FT9
MEA	3.03	0.13	1.27	0.13	0.36	0.54	2.79	0.11	1.11	2.78	0.54	1.14
MDEA	4.85	0.21	1.83	0.96	1.83	0.67	4.28	0.32	1.64	4.27	0.89	1.47
DEA	7.71	1.25	2.95	1.81	2.83	0.80	7.16	0.86	2.83	7.13	0.49	2.84
Average	5.42	0.59	2.10	1.15	2.84	0.58	4.96	0.47	1.95	4.94	0.63	1.91

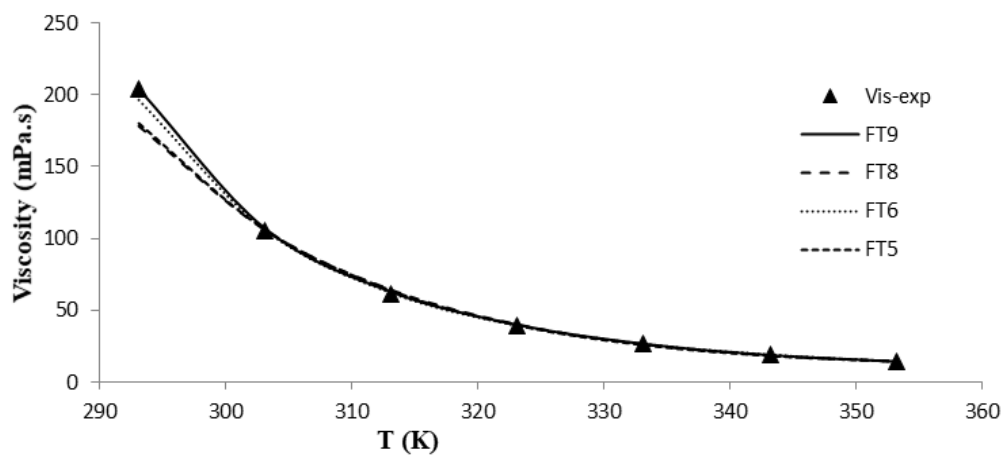


شکل ۲ عملکرد برازش رویکرد FT-PR-SRK برای سامانه‌های [Cnmim][BF₄]، [Cnmim][PF₆] و [Cnmim][Tf₂N] systems
 Figure2. Correlating performance of the FT-6SRK approach for [Cnmim][BF₄] systems

در این جدول آورده شده است برای سامانه‌های مایع یونی-مایع یونی کارایی هم‌رایی نظریه FT با معادله حالت مکعبی مناسب است. در مورد سامانه‌های مایع یونی-آلکانول آمین نتایج متفاوت از سامانه‌های مایع یونی-مایع یونی است. برخلاف سامانه‌های خالص رویکرد FT5-SRK با معادله ۱۶ برتر از سایر رویکردهای FT-SRK است و مقدار AARD آن برابر با ۷/۵۴٪ است. در مورد رویکردهای FT6-SRK و FT6-PR، کارایی هر دو حالت تقریباً یکسان بوده است. علاوه بر این می‌توان گفت در میان تمام رویکردهای FT، FT5 و FT6 دارای بیشترین تطابق با مقادیر تجربی بوده و برای رویکردهای FT9 و FT8 تخمین گرانشی وضعیت مناسبی نداشته است.

شکل ۳ نیز تفاوت رویکردهای FT-SRK برای مایع یونی [emim][ac] را در گستره دمای ۳۵۳/۱۵-۲۹۳/۱۵ و فشار اتمسفر نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ درمی‌یابیم که رویکردهای FT9-SRK و FT6-SRK با نتایج تجربی مطابق بوده است. در مورد رویکردهای FT5-SRK و FT8-SRK در دماهای پایین بین مقادیر تجربی و تخمین زده شده اختلاف کمی وجود دارد که با افزایش دما این اختلاف کاهش یافته است. همچنین قابل مشاهده است که بیشینه گرانشی معمولاً در دماهای پایین اتفاق می‌افتد.

در جدول ۷ نیز مقادیر AARD بهینه شده برای تمام رویکردهای FT (FT9، FT8، FT6، FT5) برای مخلوط‌های مایع یونی-مایع یونی و مایع یونی-آلکانول آمین به کمک قوانین اختلاط آورده شده است. همان‌طور که



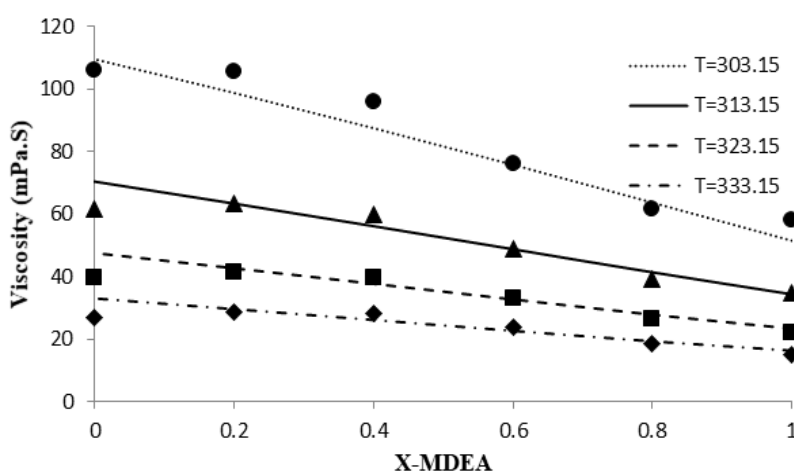
شکل ۳ مقایسه رویکردهای FT5-SRK، FT6-SRK، FT8-SRK و FT9-SRK در دماهای مختلف و فشار اتمسفری
Figure 3. Comparison of the correlation of various viscosity isobars over a wide temperature range for [emim][ac] using the FT5-SRK, FT6-SRK, FT8-SRK and FT9-SRK

جدول ۷ نتایج خطای گرانیوی مخلوط های دوتایی (مایع یونی-یونی و مایع یونی-آلکانول آمین) با مدل های FT-SRK و FT-PR
 Table-7 Resulting viscosity deviations binary mixture (IL-IL, IL-Alkanolamine) using the FT-PR and FT-SRK version models

Mixture	PR-Eq 16			SRK-Eq 16			PR-Eq 27			SRK-Eq 28						
[emim] [BF ₄] + [hmim] [BF ₄]	7.38	3.89	4.55	2.09	3.00	2.79	4.20	2.10	3.46	2.90	2.73	3.12	6.11	2.98	4.77	4.50
[bmim] [PF ₆] + [bmim] [BF ₄]	1.77	1.67	1.56	1.56	1.51	1.62	1.53	1.57	1.54	1.60	1.52	1.61	1.59	1.59	1.69	1.61
MDEA+[hmim] [Tf ₂ N]	20.93	24.69	8.15	10.93	12.10	23.99	13.06	8.27	16.18	14.42	8.08	10.31	23.14	15.41	8.13	5.72
MDEA+[hmim] [BF ₄]	18.60	20.14	3.95	4.69	14.04	19.03	7.53	4.24	7.31	18.11	1.92	9.06	24.16	12.99	3.57	8.12
MDEA+[emim] [ac]	5.68	28.53	6.62	6.72	9.84	11.10	6.96	6.61	12.48	24.58	6.25	6.79	7.59	10.51	7.94	6.80
DEA+[emim] [ac]	12.87	-	5.62	10.90	16.95	13.99	6.42	8.81	8.79	-	6.04	8.69	7.50	14.35	15.39	8.47
MDEA+[bmim] [ac]	8.59	19.17	7.96	9.17	19.58	16.92	8.48	26.47	13.32	26.48	18.38	10.69	13.51	16.44	8.32	8.33
MEA+[bmim] [BF ₄]	-	-	12.11	9.73	-	-	27.68	9.65	-	7.54	10.15	6.60	-	-	13.54	6.62
DEA+[bmim] [ac]	14.71	19.44	12.29	11.39	13.46	25.45	10.71	23.98	9.19	-	6.61	11.01	23.81	21.22	12.68	9.48
Average IL-IL	4.42	2.72	2.97	1.81	2.21	2.17	2.79	1.82	2.45	2.21	2.09	2.32	3.73	2.25	3.15	2.98
Average Alkanolamine-IL	14.15	22.41	8.09	8.99	14.20	18.70	12.10	11.94	11.28	17.46	8.04	8.97	17.29	15.04	9.73	7.54

پیش‌بینی گرانیوی مایعات یونی و آلکانول‌آمین‌های خالص دقت بالایی داشته‌اند. در بین ۴ حالت نظریه اصطکاک ضرایب اصطکاک ۹ و ۶ پارامتری بهترین عملکرد را در پیش‌بینی گرانیوی مایعات یونی و آلکانول‌آمین خالص داشته است. در مخلوط مایع یونی-مایع یونی که شامل $[BF_4][emim]$ و $[hmim]$ و $[bmim][PF_6]$ است مقادیر گرانیوی حاصل از نظریه اصطکاک تطابق خوبی با مقادیر تجربی داشته

شکل ۴ کارایی رویکرد FT5-SRK با معادله ۲۷ در ارتباط با رفتار گرانیوی $MDEA+[emim][ac]$ در چهار دمای K (۳۰۳/۱۵، ۳۱۳/۱۵، ۳۲۳/۱۵ و ۳۳۳/۱۵) در کسر مولی‌های مختلف (۰-۱) با فاصله‌های ۰/۲) شرح داده شده است. با توجه به شکل ۴ در دمای K ۳۰۳/۱۵ و در کسر مولی‌های ۰/۲ و ۰/۴ اختلاف بین مقادیر تجربی و تخمین زده شده بیشتر است که با افزایش دما کاهش یافته است.



شکل ۴ برازش گرانیوی $MDEA+[emim][ac]$ در دماهای مختلف با استفاده از رویکرد FT5-SRK در کسر مولی‌های مختلف و فشار اتمسفری
Figure 4. Correlation of various viscosity isotherms over a wide mole fraction range for $MDEA+[emim][ac]$ using the FT5-SRK approach

و در تمام حالات مقدار AARD زیر ۷/۵٪ بوده است. در مورد ترکیبات مایع یونی-آلکانول‌آمین نظریه اصطکاک ۵ و ۶ پارامتری در تمامی مخلوط‌ها دارای مقادیر AARD قابل‌قبولی است. علاوه بر این همان‌طور که گفته شد در این مطالعه از دو حالت ساده و مشتقی معادلات SRK و PR (معادلات ۱۶ و ۲۷ و ۲۸) در پیش‌بینی فشار جاذبه و دافعه استفاده شد که نتایج AARD نشان می‌دهد هنگامی که از حالت اول معادله حالت (معادله ۱۶) PR استفاده کرده‌ایم نتایج بهتری دریافت شده است و در مورد معادله حالت SRK حالت دوم معادله حالت (معادله ۲۸)، میزان دقت بالاتری داشته است.

۴ نتیجه‌گیری

آلکانول‌آمین‌ها و مایعات یونی هر دو از حلال‌های مورد استفاده در جداسازی گازهای CO_2 و SO_2 در صنعت هستند. اما ضعف‌های موجود در هر یک از این حلال‌ها به‌عنوان مثال فشار بخار بالای آمین که باعث اتلاف و خوردگی می‌شود و گرانیوی بالای مایعات یونی ما را بر این کار وا داشت که به بررسی گرانیوی مخلوط آلکانول‌آمین با مایع یونی بپردازیم. در این مطالعه از معادلات حالت مکعبی PR و SRK همراه با نظریه اصطکاک برای مدل‌سازی گرانیوی مایعات یونی و آلکانول‌آمین خالص و مخلوط این دو استفاده کرده‌ایم. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد معادلات حالت SRK و PR همراه با نظریه اصطکاک در

مراجع

- [1] Bottoms R.P., A Study on the Reaction Between CO₂ and Alkanolamines in Aqueous Solutions, US Pat. 1783901, 1930.
- [2] Walden P., Molecular Weights and Electrical Conductivity of Several Fused Salts, Bull. Acad. Imper. Sci. (St. Petersburg), 1800, 1914.
- [3] Kotian-Nejad H., Comparison of Two Absorption Methods of SO₂ with Water and [Bmim][BF₄] Ionic Liquid, the 6th National conference & Exhibition on Environmental Engineering, Tehran university, 17-21 October, 2012.
- [4] Zhao Y., Zhang X., Zeng S., Zhou Q., Dong H., Tian X., Zhang S., Density, Viscosity, and Performances of Carbon dioxide Capture in 16 Absorbents of Amine+ Ionic Liquid+ H₂O, Ionic Liquid+ H₂O, and Amine+ H₂O Systems, Journal of Chemical & Engineering Data, 55(9), 3513-3519, 2010.
- [5] Ahmady A., Hashim M.A., Aroua M.K., Experimental Investigation on the Solubility and Initial Rate of Absorption of CO₂ in Aqueous Mixtures of Methyl-diethanolamine with the Ionic Liquid 1-Butyl-3-Methylimidazolium Tetrafluoroborate, Journal of Chemical & Engineering Data, 55(12), 5733-5738, 2010.
- [6] Quiñones-Cisneros S.E., Zéberg-Mikkelsen C.K., Stenby E.H., The Friction Theory (F-Theory) for Viscosity Modeling, Fluid Phase Equilibria, 169(2), 249-276, 2000.
- [7] Abolala M., Peyvandi K., Varaminian F., Modeling the Viscosity of Pure Imidazolium-Based Ionic Liquids Using SAFT-VR-Mie EoS, Fluid Phase Equilibria, 394, 61-70, 2015.
- [8] Macías-Salinas R., Viscosity Modeling of Ionic Liquids Using the Friction Theory and a Simple Cubic Equation of State, Industrial & Engineering Chemistry Research, 57(3), 1109-1120, 2018.
- [9] Quiñones-Cisneros S.E., Zéberg-Mikkelsen C.K., Stenby E.H., One Parameter Friction Theory Models for Viscosity, Fluid Phase Equilibria, 178(1-2), 1-16, 2001.
- [10] Quiñones-Cisneros S.E., Deiters U.K., Generalization of the Friction Theory for Viscosity Modeling, The Journal of Physical Chemistry B, 110(25), 12820-12834, 2006.
- [11] Macías-Salinas R., Viscosity Modeling of Ionic Liquids Using the Friction Theory and a Simple Cubic Equation of State, Industrial & Engineering Chemistry Research, 57(3), 1109-1120, 2018.
- [12] Hill T. L., Statistical-Thermodynamics, Addison-Wesley, 1960.
- [13] Quiñones-Cisneros S.E., Zéberg-Mikkelsen C.K., Fernández J., García J., General Friction Theory Viscosity Model for the PC-SAFT Equation of State. AIChE journal, 52(4), 1600-1610, 2006.
- [14] Sanmamed Y.A., González-Salgado D., Troncoso J., Romani L., Baylaucq A., Boned C., Experimental Methodology for Precise Determination of Density of RTILs as a Function of Temperature and Pressure Using Vibrating Tube Densimeters. The Journal of Chemical Thermodynamics, 42(4), 553-563, 2010.
- [15] Tomida D., Kumagai A., Qiao K., Yokoyama C., Viscosity of [bmim][PF₆] and [bmim][BF₄] at High Pressure, International journal of Thermophysics, 27(1), 39-47, 2006.
- [16] Harris K.R., Kanakubo M., Woolf L.A., Temperature and Pressure Dependence of the Viscosity of the Ionic Liquid 1-Butyl-3-Methylimidazolium Tetrafluoroborate: Viscosity and Density Relationships in Ionic Liquids, Journal of Chemical & Engineering Data, 52(6), 2425-2430, 2007.
- [17] Ahosseini A., Scurto A. M., Viscosity of Imidazolium-Based Ionic Liquids at Elevated Pressures: Cation and Anion Effects, International Journal of Thermophysics, 29(4), 1222-1243, 2008.
- [18] Harris K.R., Woolf L.A., Kanakubo M., Temperature and Pressure Dependence of the Viscosity of the Ionic Liquid 1-Butyl-3-Methylimidazolium Hexafluorophosphate, Journal of Chemical & Engineering Data, 50(5), 1777-1782, 2005.
- [19] Harris, K. R., Kanakubo, M., & Woolf, L. A. Temperature and Pressure Dependence of the Viscosity of the Ionic Liquids 1-Hexyl-3-Methylimidazolium Hexafluorophosphate and 1-Butyl-3-Methylimidazolium Bis (Trifluoromethylsulfonyl) Imide. Journal of Chemical & Engineering Data, 52(3), 1080-1085, 2007.
- [20] Harris K.R., Kanakubo M., Woolf L.A., Temperature and Pressure Dependence of the Viscosity of the Ionic Liquids 1-Methyl-3-Octylimidazolium Hexafluorophosphate and 1-Methyl-3-Octylimidazolium Tetrafluoroborate, Journal of Chemical & Engineering Data, 51(3), 1161-1167, 2006.
- [21] Tomida D., Kumagai A., Kenmochi S., Qiao K., Yokoyama C., Viscosity of 1-Hexyl-3-Methylimidazolium Hexafluorophosphate and 1-Octyl-3-Methylimidazolium Hexafluorophosphate at High Pressure, Journal of Chemical & Engineering Data, 52(2), 577-579, 2007.
- [22] Song D., Chen J., Density and Viscosity Data for Mixtures of Ionic Liquids with a Common Anion, Journal of Chemical & Engineering Data, 59(2), 257-262, 2014.
- [23] Navia P., Troncoso J., Romani L., Viscosities for Ionic Liquid Binary Mixtures with a Common Ion, Journal of Solution Chemistry, 37(5), 677-688, 2008.
- [24] Akbar M.M., Murugesan T., Thermophysical Properties for the Binary Mixtures of 1-Hexyl-3-Methylimidazolium Bis (Trifluoromethylsulfonyl) Imide [Hmim][Tf₂N]+N-Methyl-diethanolamine (MDEA) at Temperatures (303.15 to 323.15) K, Journal of Molecular Liquids, 169, 95-101, 2012.

- [25] Akbar M.M., Murugesan T, Thermophysical Properties of 1-Hexyl-3-Methylimidazolium Tetrafluoroborate [hmim][BF₄]+N-Methyldiethanolamine (MDEA) at Temperatures (303.15 to 323.15) K, Journal of Molecular Liquids, 177, 54-59, 2013.
- [26] Haghtalab A., Shojaeian A., Volumetric and Viscometric Behaviour of the Binary Systems of N-Methyldiethanolamine and Diethanolamine with 1-Butyl-3-Methylimidazolium Acetate at Various Temperatures, The Journal of Chemical Thermodynamics, 68, 128-137, 2014.
- [27] Yin Y., Zhu C., Ma Y., Volumetric and Viscometric Properties of Binary and Ternary Mixtures of 1-Butyl-3-Methylimidazolium Tetrafluoroborate, Monoethanolamine and Water, The Journal of Chemical Thermodynamics, 102, 413-428, 2016.
- [28] Shojaeian A., Hanifehei M., Fatoorehchi H., Density, Viscosity, and Refractive Index Measurements for Binary Mixtures of N-Methyldiethanolamine (MDEA), Diethanolamine (DEA), and 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol (AMP) with 1-Ethyl-3-Methylimidazolium Acetate ([Emim][Ac]), Journal of Chemical & Engineering Data, 66, 9, 3520-3530, 2021.
- [29] NIST/TDE, NIST (National Institute of Standards and Technology), Thermo Data Engine (Aspen Plus V8.0), Applied Chemicals and Materials Division, 2013.
- [30] Haghbakhsh R., Parvaneh K., Shariati A., Viscosities of Pure Ionic Liquids Using Combinations of Free Volume Theory or Friction Theory with the Cubic, the Cubic Plus Association, and the Perturbed-Chain Statistical Associating Fluid Theory Equations of State at High Pressures, Industrial & Engineering Chemistry Research, 56(8), 2247-2258, 2017.
- [31] Shen G., Held C., Mikkola J.P., Lu X., Ji X., Modeling the Viscosity of Ionic Liquids with the Electrolyte Perturbed-chain Statistical Association Fluid Theory, Industrial & Engineering Chemistry Research, 53(52), 20258-20268, 2014.