

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.

key words

Ionic Liquid

Alkanolamine

Modeling

Viscosity

Friction Theory

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

مدل‌سازی گرانروی 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 منحصربه‌فردی دارند. طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های حذف گازهای اسیدی از گاز طبیعی و همچنین جداسازی گاز دی‌اکسیدکربن 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 گرانروی ۳ آلکانول آمین (مونواتانول آمین، متیل‌دی‌اتانول آمین و دی‌اتانول آمین) و ۱۲ مایع یونی برپایه ایمیدازولیوم (تترافلورابورات، هگزاfluورافسفات و بیس‌تری‌فلورومتیل‌سولفونیل‌امید) 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، گرانروی 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 گرانروی 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 ۴/۷۱٪ و ۱/۶۶٪ است. در معادله حالت سوآو-ردلیچ-وانگ این مقادیر ۴/۷۰٪ و ۱/۹۹٪ است. در مخلوط‌های مایع یونی-مایع یونی مقادیر گرانروی 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.

کلمات کلیدی

مایعات یونی

آلکانول آمین‌ها

مدل‌سازی

گرانروی

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_2 را با محلول های آب+آلکانول آمین+مایع یونی، آب+مایع یونی و آب+آلکانول آمین مورد بررسی قرار دادند. آن ها مشاهده کردند که در میان آلکانول آمین ها، متیل دی اتانول آمین (MDEA) به دلیل هدر رفت پایین مناسب ترین 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_2 سرعت جذب بالاتر از زمانی است که از آلکانول آمین خالص استفاده می شود در این زمینه احمدی و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۰ طی آزمایش هایی سرعت جذب اولیه و حلالیت CO_2 را در محلول آب+MDEA با غلظت های مختلف مایع یونی ۱-بوتیل-۳-متیل ایمیدازولیوم ($[bmim][BF_4]$) در فشارهای زیر ۱۱۰ کیلو پاسکال اندازه گیری کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که غلظت کمی از $[bmim][BF_4]$ در محلول ۴ مولار MDEA اثر قابل توجهی بر میزان جذب نهایی ندارد اما سرعت اولیه جذب را افزایش می دهد. همچنین غلظت بالای مایع یونی باعث کاهش ظرفیت جذب CO_2 شده است به همین علت با تنظیم غلظت مایع یونی می توان به محلولی با قدرت و سرعت جذب بالا دست یافت. همان طور که در بالا گفته شد برای استفاده از حلال در صنعت نیازمند خواص فیزیکی مانند چگالی و گرانروی هستیم. یکی از راه های 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 آن ها 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 در نهایت گرانروی ۱۲ مایعات یونی و ۳ آلکانول آمین خالص و مخلوط های مختلف مایع یونی-مایع یونی (۲ سامانه) و مایع یونی-آلکانول آمین (۷ سامانه) پرداخته ایم.

نظریه مدل سازی

پیش بینی گرانروی مایعات یونی و آلکانول آمین ها در این مطالعه با کمک معادله کاینانس کیسنروس و همکاران [۶] انجام می شود. 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 بین مولکولی نادیده گرفته می شود و $\Delta\eta$ عبارت باقی مانده گرانروی است.

در حال حاضر سوخت فسیلی مهم ترین منبع انرژی جهان است که منبع اصلی تولید گاز گلخانه ای است. از روش های رایج برای جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه ای جذب آن ها توسط حلال ها است. از این رو طراحی و بهینه سازی سامانه های حذف گازهای اسیدی از گاز طبیعی و همچنین جداسازی گاز دی اکسید کربن از جریان مخلوط گازها از جمله گاز دودکش نیازمند خواص فیزیکی مانند چگالی و گرانروی حلال ها است. از جمله این حلال ها که در صنعت به کار می رود آلکانول آمین ها است. عملکرد آلکانول آمین ها در جذب هیدروژن سولفید و دی اکسید کربن اولین بار توسط باتومز [۱] آزمایش شد. مهم ترین 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 حلال های جدیدی برای جذب SO_2 و CO_2 باشند. مایعات یونی به عنوان یکی از حلال های غیر فرار است که به علت فشار بخار پایین، شیمی دان ها آن ها را جزء حلال های سبز دسته بندی می کنند. مایعات یونی به صورت شبکه سه بعدی از کاتیون های آلی و آنیون های آلی یا معدنی هستند که با نیروهای نظیر پیوندهای هیدروژنی و نیروی الکترواستاتیک به هم متصل می شوند. مهم ترین 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 می شود. این موضوع باعث فراهم شدن محیط غیر آبی در دمای پایین و در نتیجه امکان انجام واکنش های متعدد در آن ها می شود. همچنین با تغییر نوع کاتیون و یا آنیون خواص آن ها قابل تغییر و تنظیم است، از این رو به مایعات یونی حلال طراح نیز می گویند. مایعات یونی اولین بار با سنتز اتیل آمونیوم نیترات توسط والدن [۲] در سال ۱۹۱۴ شناخته شدند که حاصل واکنش بین اتیل آمین با اسید نیتریک 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 آمین ها 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 فراورده های نفتی بود. یکی از راه های استفاده از مایعات یونی در جذب گازهای اسیدی، اختلاط آن با آلکانول آمین ها 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 مخلوط های 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 گرانیروی نیوتن تنش برشی مناسب با گرانیروی 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 پیش بینی می شوند. k_r , k_a , k_{rr} , k_{aa} ضرایب اصطکاک وابسته به دما هستند که برای بیشتر مایعات به صورت تابع نمایی بیان می شود. علاوه بر این برای مایعات گرانیرو مانند مایعات یونی فاصله بین مولکولی در حرکت لایه ها روی هم کم است. در نتیجه قدرت نیروی دافعه بیشتر می شود از این روی می توان 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 می پردازیم.

حالت اول (FT۵): پیوندی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۵ از نظریه اصطکاک ۵ پارامتری برای تخمین گرانیروی مایعات یونی با استفاده از معادلات حالت SAFT استفاده کردند. در این مطالعه نیز از این حالت نظریه اصطکاک همراه با معادله حالت های ساده تر استفاده می شود.

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

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

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

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

$$\Omega^* = \frac{1.16145}{T^* 0.14874} + \frac{0.52487}{\exp(0.77320 T^*)} + \frac{2.16178}{\exp(2.43787 T^*)} \quad (3)$$

$$-6.435 \times 10^{-4} (T^*)^{0.14874} \sin(18.0323(T^*)^{-0.76830} - 7.2737)$$

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 می شود:

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

در رابطه (۴) ω ضریب بی مرکزیت، 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 گرانیروی گاز نسبت به مایعات، از گرانیروی گازها صرف نظر کرده ایم و عبارت دوم مربوط به گرانیروی باقیمانده اس که بر اساس تنش برشی بین دو سطح سیال پیش بینی می شود. قوانین اصطکاک نشان می دهد 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 می توان 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 مناسب تر 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 حالت های PR و SRK عملکرد نظریه اصطکاک برای ۱۲ مایع یونی و ۳ آلکانول آمین در ۱۶ حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

برای پیش بینی گرانیوی مخلوط مایعات یونی و آلکانول آمین ها نیز ابتدا باید چگالی آن ها 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 کوینونس و همکارانش [۶] به صورت زیر بیان شده اند.

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

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

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

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

ضرایب $a_1, a_2, b_1, b_2, c_2, c_3$ 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 بی مرکزی، دما و فشار بحرانی دارد و ضریب b تابعیتی از دما و فشار بحرانی دارد:

$$a_i = \Omega_a \frac{R^2 T_{ci}^2}{P_{ci}} \times \alpha(T), \quad \begin{cases} \alpha(T) = \left[1 + m \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_{ci}}} \right) \right]^2 \\ m = m_0 + m_1 \omega_1 + m_2 \omega_1^2 \end{cases} \quad (17)$$

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

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 می توانند در صرفه جویی زمان و انرژی، مفید باشد از این رو استفاده از حالات دیگر نظریه اصطکاک می تواند در رسیدن به بازده بالاتر کمک کند. در این زمینه کوینونس کیسنروز و همکاران [۹] نظریه اصطکاک ۸ پارامتری را پیشنهاد داده اند.

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

	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 پرداخته ایم.

با در نظر گرفتن اثر متقابل مولکول ها 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 می آیند.

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

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

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 گرانروی مخلوط و زیرنویس i نشان دهنده اجزای خالص است. z_i کسر جرمی جزء i است که به صورت زیر تخمین زده می شود:

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

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

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

۳ نتایج و بحث

در این مطالعه، چهار حالت مختلف نظریه اصطکاک با معادله حالت های مکعبی SRK و PR برای پیش بینی گرانروی سه خانواده از مایعات یونی $[C_xmim][BF_4]$ ، $[C_xmim][PF_6]$ و $[C_xmim][Tf_2N]$ و آلکانول آمین های MEA، MDEA و DEA و مخلوط این دو گروه همراه شده اند. بعد از پیش بینی چگالی، با کمک حالت های مختلف نظریه اصطکاک گرانروی 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 گرانروی و تعیین میزان انحراف مقادیر حاصل شده از مدل سازی با مقادیر موجود در منابع (مقادیر گرانروی تجربی) از رابطه زیر استفاده شده است.

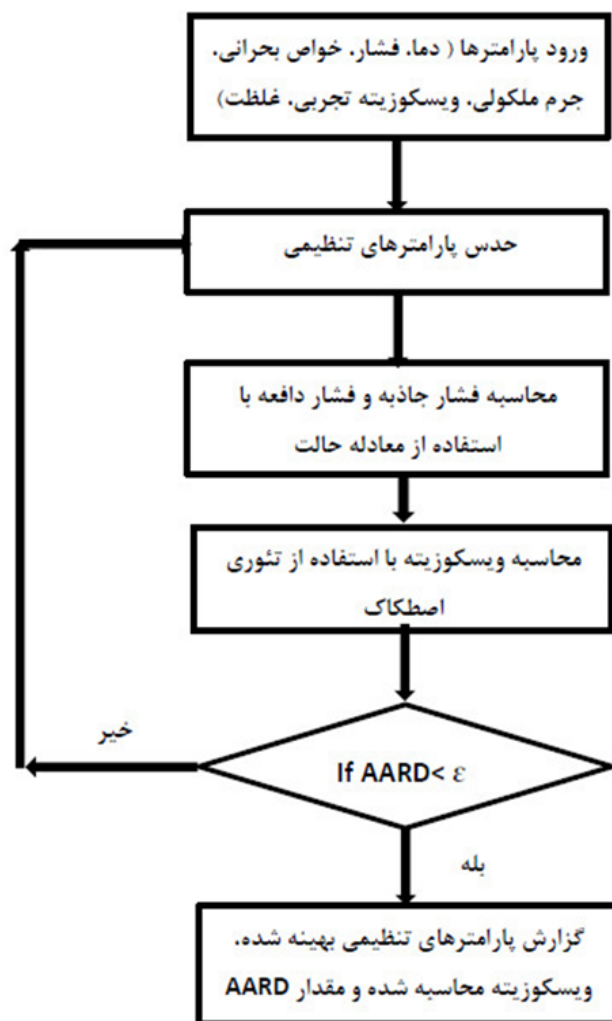
$$AARD\% = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \left| \frac{Y_{exp} - Y_{lit}}{Y_{exp}} \right| * 100 \quad Y = \eta \quad (39)$$

n تعداد داده های تجربی و اندیس های exp و lit به ترتیب داده های تجربی و مقادیر به دست آمده از مدل است. همچنین جهت به دست آوردن پارامترهای بهینه معادلات نظریه اصطکاک در حالت خالص و مخلوط های دو جزئی از تابع هدف به صورت معادله ۳۹ استفاده شده است. برای بیان منسجم تر روند بهینه سازی پارامترهای مدل فلوچارت محاسباتی گرانروی به صورت شکل ۱ ارائه شده است. همچنین تمام پارامترهای بهینه سازی 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 می دهد که رویکرد FT۹-SRK و زمانی که از فرم معادله ۱۶ معادله حالت استفاده می شود کم ترین خطا ($AARD\% = 1/84$) را در بین سایر حالت ها نشان می دهد. 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 می توان 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 ارائه شده 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 کرده اند و هر دو از نظریه اصطکاک ۱۲ پارامتری استفاده کرده اند 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 مدل های استفاده شده توسط حق بخش و همکاران [۳۰] و شن و همکاران [۳۱] با توجه به معادله ساده تر و تعداد پارامترهای کمتر قابل قبول است. همان طور که در جدول ۶ نشان داده شده است تمامی حالت های نظریه اصطکاک در پیش بینی گرانروی آلکانول آمین ها موفق عمل کرده است. البته رویکرد FT۶-PR بهترین نتایج را با تعداد پارامترهای تنظیمی کمتر داشته است

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

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



شکل ۱ الگوریتم محاسبه گرانشی
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

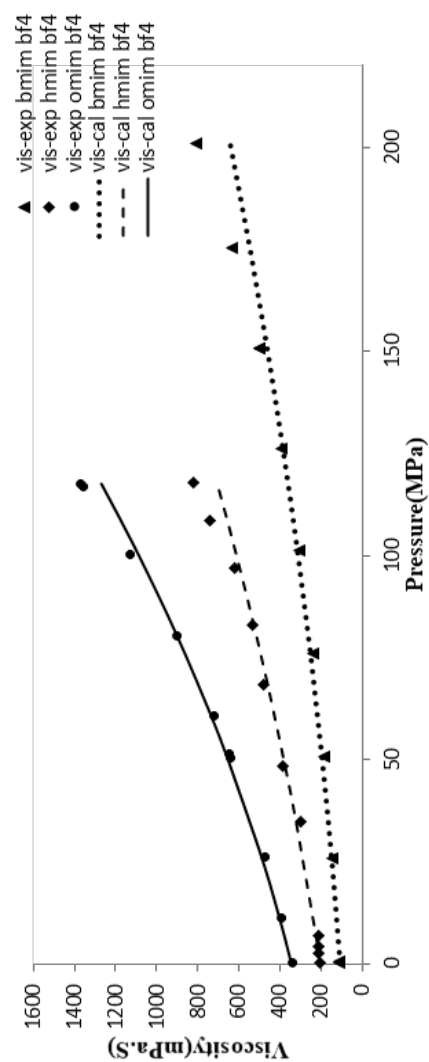
IL	PR-Eq. 16					SRK-Eq. 16					PR-Eq. 27					SRK-Eq. 28				
	FT5	FT6	FT8	FT9	FT9	FT5	FT6	FT8	FT9	FT9	FT5	FT6	FT8	FT9	FT9	FT5	FT6	FT8	FT9	FT9
[emim] [BF ₄]	0.82	0.54	3.80	0.43	0.43	0.85	0.51	1.71	0.43	0.43	1.05	0.50	0.63	0.70	0.70	1.30	0.51	0.68	0.44	0.44
[bmim] [BF ₄]	9.45	4.95	8.17	2.72	2.72	10.49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

جدول ۵ مقایسه نتایج حاصل از این کار (مدل FT^۹-SRK) با کارهای دیگر [۳۰ و ۳۱]
Table 5: Comparison of the results of this work (FT^۹-SRK) with other works [30,31]

	SRK-Eq. 16	CPA [30]	PC-SAFT [30]	ePC-SAFT [31]
IL	FT ^۹	FT ^{۱۲} [30]	FT ^{۱۲} [30]	FT ^{۱۲} [31]
[emim] [BF ₄]	0.43	0.73	0.74	-
[bmim] [BF ₄]	2.59	3.45	2.70	2.41
[hmim] [BF ₄]	1.04	1.88	1.38	1.05
[bmim] [PF ₆]	2.66	5.83	5.66	1.87
[hmim] [Tf ₂ N]	0.56	1.26	0.84	0.47
[emim] [ac]	0.97	-	-	-
[bmim] [ac]	0.92	-	-	-
[emim] [Tf ₂ N]	1.05	2.10	1.49	0.58
[bmim] [Tf ₂ N]	2.71	1.59	0.64	0.79
[omim] [BF ₄]	1.37	-	-	-
[hmim] [PF ₆]	2.54	5.19	4.33	1.79
[omim] [PF ₆]	1.27	6.04	3.51	1.17
Average	1.84	3.12	2.37	1.48

جدول ۶ نتایج خطای آلکانول آمین های خالص با استفاده از مدل های 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	FT8	FT9	FT5	FT6	FT8	FT9	FT5	FT6	FT8	FT9	FT5	FT6	FT8	FT9	FT5	FT6	FT8	FT9
MEA	3.03	0.13	1.27	0.54	3.05	0.36	3.86	0.19	2.79	0.11	1.11	0.96	2.78	0.54	1.14	4.41				
MDEA	4.85	0.21	1.83	0.92	4.67	0.96	1.83	0.67	4.28	0.32	1.64	0.65	4.27	0.89	1.47	0.70				
DEA	7.71	1.25	2.95	1.81	7.72	1.81	2.83	0.80	7.16	0.86	2.83	1.53	7.13	0.49	2.84	1.04				
Average	5.42	0.59	2.10	1.15	5.38	1.11	2.84	0.58	4.96	0.47	1.95	1.09	4.94	0.63	1.91	1.96				

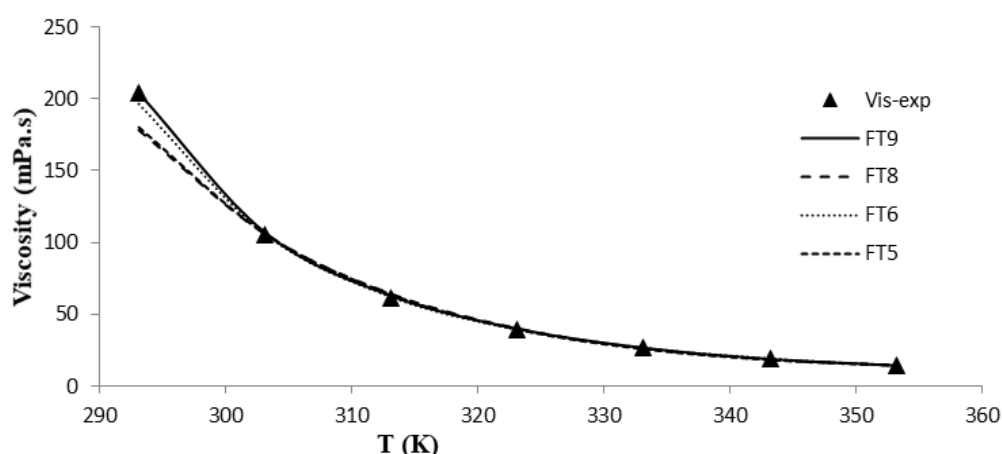


شکل ۲ عملکرد برازش رویکرد FT-6SRK برای سامانه های [Cnmim][BF₄] systems
Figure2. Correlating performance of the FT-6SRK approach for [Cnmim][BF₄] systems

در این جدول آورده شده است برای سامانه‌های مایع یونی-مایع یونی کارایی همراهی 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 FT-SRK با معادله ۱۶ برتر از سایر رویکردهای FT-SRK است و مقدار AARD آن برابر با ۷/۵۴٪ است. در مورد رویکردهای FT-SRK و FT-PR، کارایی هر دو حالت تقریباً یکسان بوده است. علاوه بر این می‌توان گفت در میان تمام رویکردهای FT، FT۵ و FT۶ دارای بیشترین تطابق با مقادیر تجربی بوده و برای رویکردهای FT۹ و FT۸ تخمین گرانیروی 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 FT۹-SRK و FT۶-SRK با نتایج تجربی مطابق بوده است. در مورد رویکردهای FT۵-SRK و FT۸-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 گرانیروی معمولاً در دماهای پایین اتفاق می‌افتد.

در جدول ۷ نیز مقادیر AARD بهینه شده برای تمام رویکردهای FT (FT۹، FT۵، FT۶، FT۸) برای مخلوطهای مایع یونی-مایع یونی و مایع یونی-آلکانول آمین به کمک قوانین اختلاط آورده شده است. همان‌طور که



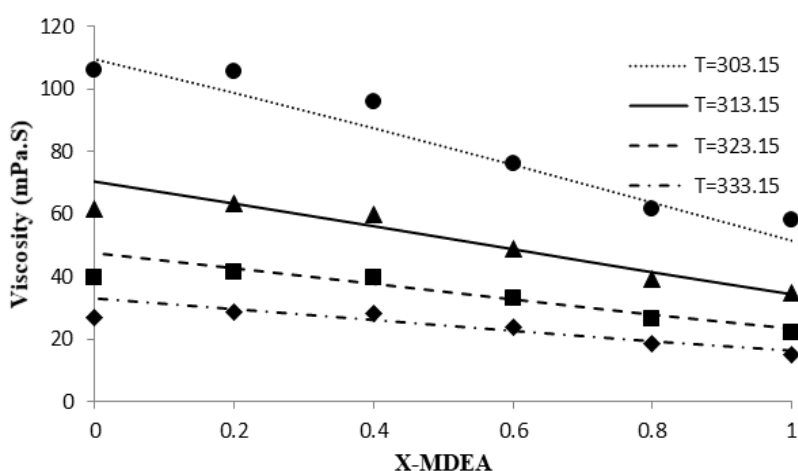
شکل ۳ مقایسه رویکردهای FT۵-SRK، FT۶-SRK، FT۸-SRK، FT۹-SRK در دماهای مختلف و فشار اتمسفری
Figure 3. Comparison of the correlation of various viscosity isobars over a wide temperature range for [emim][ac] using the FT5-SRK, FT6-SRK, FT8-SRK and FT9-SRK

جدول ۷ نتایج خطای گرانیروی مخلوط های دوتایی (مایع یونی-مایع یونی و مایع یونی-آلکانول آمین) با مدل های FT-PR و FT-SRK
 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 آلکانول آمین‌های 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 آلکانول آمین خالص داشته است. در مخلوط مایع یونی-مایع یونی که شامل $[BF_4][emim]$ $[BF_4][hmim]$ 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 303.15 ، 313.15 ، 323.15 و 333.15 در کسر مولی‌های مختلف (۰-۱) با فاصله‌های 0.2 شرح داده شده است. با توجه به شکل ۴ در دمای K 303.15 و در کسر مولی‌های 0.2 و 0.4 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-آلکانول آمین نظریه اصطکاک ۵ و ۶ پارامتری در تمامی مخلوط‌ها دارای مقادیر AARD قابل قبولی 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

آلکانول آمین‌ها 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 واداشت که به بررسی گرانیوی مخلوط آلکانول آمین با مایع یونی بپردازیم. در این مطالعه از معادلات حالت مکعبی PR و SRK همراه با نظریه اصطکاک برای مدل‌سازی گرانیوی مایعات یونی و آلکانول آمین 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 CO_2 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 SO_2 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+ H_2O , Ionic Liquid+ H_2O , and Amine+ H_2O 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 CO_2 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] Aghosseini 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.