

ارایه قانون اختلاط جدید برای پیش‌بینی کشش سطحی مخلوط‌ها

بهرروز میرزایی*⁺

اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی شیمی

چکیده: در این مقاله، یک قانون اختلاط جدید برای پیش‌بینی کشش سطحی مخلوط‌های مایع ارایه شده است. معادله ارایه شده ترکیبی از معادله گیبس - ولمر با مدل ضریب فعالیت *NRTL* می‌باشد. مدل ارایه شده می‌تواند کشش سطحی انواع گوناگونی از محلول‌های آبی و غیرآبی را در بازه‌ی گسترده‌ای از غلظت پیشگویی نماید. در این کار برای بررسی توانایی مدل، کشش سطحی چندین سامانه دو جزئی مایع به‌طور آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه تانسیموتر مدل *Kruss K20 Easy Dyne* اندازه‌گیری شد. همچنین از داده‌های آزمایشگاهی موجود در مقاله‌ها نیز برای ارزیابی قابلیت مدل، استفاده شد. نتیجه‌ها نشان دادند که مدل ارایه شده با دقت قابل قبولی می‌تواند داده‌های آزمایشگاهی مربوط به انواع محلول‌ها را در بازه‌ی گسترده‌ای از غلظت اجزا پوشش دهد. به‌طوری که پیش‌بینی داده‌های مربوط به محلول‌های غیرآبی از دقت بالایی برخوردار بوده و خطای متوسط مطلق برای بیشتر این سامانه‌ها کمتر از ۱ درصد به دست آمد. برای سامانه‌های آبی با درجه غیر ایده‌آلی زیاد، انحراف از داده‌های آزمایشگاهی نسبت به دیگر سامانه‌ها بیشتر بوده است (بیشینه ۱۰ درصد). علت این خطا وجود مولکول‌هایی با پیوند هیدروژنی قوی است که یک سامانه غیرایده‌آل پیچیده تشکیل می‌دهند و حتی به‌کارگیری مدل ضریب فعالیت دقیق نمی‌تواند از ایجاد این خطا جلوگیری کند. با این حال می‌توان پیش‌بینی مدل حاضر را رضایت‌بخش و قابل قبول توصیف نمود.

واژه‌های کلیدی: کشش سطحی، قانون اختلاط، محلول‌های آبی، محلول‌های غیرآبی، تانسیموتر.

KEY WORDS: Surface tension, Mixing rule, Aqueous solutions, Non-aqueous solutions, Tensiometer.

مقدمه

بیشتر از مواد خالص به کار گرفته می‌شوند. بنابراین، پی بردن به کشش سطحی محلول‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲]. تغییرها در انرژی سطح بستگی به تغییرها در نیروهای مولکولی، چگالی و اندازه مولکولی دارد. بنابراین کشش سطحی محلول تأثیر مهمی در انتقال جرم و انرژی سطح مشترک دارد و یکی از جالب توجه‌ترین ویژگی‌های ترموفیزیکی در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند استخراج مایع - مایع، جذب گاز، تقطیر و میعان است [۳]. محلول‌های آبی و غیر آبی الکلی‌ها به‌طور گسترده مورد مطالعه

کشش سطحی به صورت نیرو در واحد طول تعریف می‌شود. مطالعه‌ها در زمینه‌ی برهمکنش بین مولکولی و نیروهای درون مایع‌ها نشان داده است که کشش سطحی به خاطر سادگی و دقت از بقیه نیروها متمایز است [۱]. شناور سازی اجسام روی آب و توانایی برخی حشره‌ها و خزندگان که روی سطح آب حرکت می‌کنند نمونه‌هایی از قدرت کشش سطحی می‌باشد. کشش سطحی یک مایع از عدم تعادل نیروهای کشش بین مولکولی نتیجه می‌شود. در بسیاری از فرایندهای تجربی، محلول‌ها

*عهدہ دار مکاتبات

+E-mail: mirzayib@uma.ac.ir

که در آن σ کشش سطحی حلال خالص، C غلظت مولی حل شونده، T دمای مطلق، R ، ثابت عمومی گازها، Γ_∞ و b پارامترهای قابل تنظیم مدل به کمک داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. معادله ارایه شده توسط وان سیزکاسکی [۸] فقط در غلظت‌های پایین حل شونده در حلال صادق است و قادر به پیش‌بینی کشش سطحی در بازه‌ی وسیعی از غلظت حل شونده نیست.

رابطه‌های دیگری برای محاسبه کشش سطحی مخلوط‌ها ارایه شده که بر اساس مفهوم ترمودینامیکی کشش سطحی بنا شده‌اند و آن به‌کارگیری مستقیم تغییرهای انرژی گیبس بر واحد سطح در دما و فشار مشخص می‌باشد. دقت رابطه‌های به دست آمده از این دیدگاه، به دقت مدل ضریب فعالیت استفاده شده بستگی دارد. مثلاً لی و وانگ [۹] از مدل ضریب فعالیت NRTL در به دست آوردن معادله مورد نظر استفاده کردند. رابطه‌های به دست آمده با اینکه از پایه‌ی نظری قوی برخوردار است ولی پیچیدگی‌های ریاضی مانند درگیری با مشتق‌های جزئی و حل آنها از نقاط ضعف این رابطه‌ها به حساب می‌آید.

با توجه به مشکل‌هایی که در ارتباط با پیش‌بینی کشش سطحی محلول‌ها وجود دارد، در این مقاله از ترکیب معادله‌ها مربوط به ضریب فعالیت فاز توده مایع (مانند معادله NRTL) همراه با ساده‌ترین معادله‌ی سطح غیرایده‌الی (معادله‌ی ولمر)، بر اساس برابری پتانسیل شیمیایی بین توده‌ی مایع و فاز سطح [۱۰]، استفاده شده است و قانون اختلاط جدیدی برای تعیین مقدارهای کشش سطحی محلول‌ها ارایه شده است.

بخش نظری

ساده‌ترین معادله حالت سطح غیر ایده‌آل، شبیه به شکل ساده شده‌ی معادله حالت واندروالس، توسط ولمر به صورت زیر پیشنهاد شده است [۱۰]:

$$\pi = (A - A_0) = RT \quad (3)$$

در این معادله π فشار سطح محلول است. (به عبارت دیگر $\pi = \sigma_1 - \sigma$ که σ کشش سطحی مخلوط و σ_1 کشش سطحی حلال خالص (جزء ۱) است که دارای بالاترین کشش سطحی است). A برابر است با مساحت بر واحد مول حل شونده‌ی اضافی در سطح مشترک، A_0 مساحت بر واحد مول حل شونده‌ی اضافی در سطح مشترک در شرایط اشباع سطح، T دمای مطلق و R ثابت عمومی گازها است. بر حسب پارامتر جذب نسبی $\Gamma = \frac{1}{A}$

قرار گرفته‌اند، زیرا اهمیت زیادی در تفهیم برهمکنش بین گروه‌های قطبی و غیر قطبی با حلال دارند. قسمت اصلی کار بر روی کشش سطحی، یافتن معادله‌ای مناسب و دقیق برای محاسبه مقدار آن در محلول‌ها می‌باشد. چنین معادله‌ای قانون اختلاط نامیده می‌شود. اگر کشش سطحی یک مایع خالص با σ_1 نشان داده شود کشش سطحی مخلوطی از مایع‌ها می‌تواند از معادله ساده $\sigma = \sum x_i \sigma_i$ محاسبه شود که در آن x_i ترکیب درصد جزء i در مخلوط می‌باشد. این معادله ساده‌ترین قانون اختلاط موجود در پیش‌بینی مقدارهای کشش سطحی محلول‌های ایده‌آل می‌باشد، محلول‌هایی که در آن، اثرهای بین مولکول‌های متجانس، همانند با اثرهای بین مولکول‌های غیر متجانس بوده و همه اجزا تأثیر یکسانی روی کشش سطحی دارند [۳، ۲]. اما همواره این سوال مطرح می‌شود که آیا این معادله پاسخگوی خوبی برای سامانه‌های غیر ایده‌آل نیز می‌باشد؟ در این راستا قانون‌های اختلاط بسیاری توسط پژوهشگران ارایه شده است. کانورس و وایت [۴] معادله‌ای را برای پیش‌بینی کشش سطحی محلول‌های دوجزئی آبی - آلی به‌صورت زیر ارایه داده‌اند که از پرکاربردترین قوانین اختلاط کشش سطحی می‌باشد.

$$\sigma = \sigma_1 - \left(1 + \frac{bx_1}{1 - ax_1}\right) x_1 (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

که در آن σ_1 و σ_2 به ترتیب کشش سطحی اجزای خالص ۱ و ۲، x_1 کسر مولی جزء ۱ در مخلوط، a و b پارامترهای قابل تنظیم مدل می‌باشند.

بر اساس این مدل، محلول به صورت دو فاز جدا از هم، یکی فاز توده‌ی مایع و دیگری فاز سطح مایع در نظر گرفته می‌شود. مولکول‌های جزء آلی در فاز سطح تجمع دارند و به دو صورت آزاد یا پیوندی می‌باشند و میزان مولکول‌های پیوندی متناسب با مولکول‌های آب است که در ناحیه سطح موجود هستند. اگرچه پژوهشگران این معادله را با استفاده از آزمایش‌ها و نتیجه‌های به‌دست آمده به رسمیت شناخته‌اند [۷ - ۵]، اما با این وجود به دلیل نبود پایه نظری قابل استناد در فرضیه‌های آن، همیشه با تردید به آن نگریسته‌اند.

معادله شبه تجربی دیگری توسط وان سیزکاسکی [۸] برای پیش‌بینی کشش سطحی محلول‌ها به‌صورت زیر ارایه شده است:

$$\sigma = \sigma_0 - RT\Gamma_\infty \ln\left(1 + \frac{C}{b}\right) \quad (2)$$

معادله ولمر به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\gamma}{\Gamma} = \frac{RT}{\pi} + \frac{\gamma}{\Gamma_0} \quad (4)$$

که در آن، Γ_0 مقدار جذب نسبی برای حالتی است که سطح توسط حل شونده اشباع شده است. با به‌کارگیری معادله جذب گیبس $d\pi = \Gamma d\mu_p$ و استفاده از معادله ولمر، معادله زیر برای پتانسیل شیمیایی سطح به دست می‌آید:

$$\mu_p^s = \mu_p^{0,s} + RT \ln \pi^* - \frac{\pi^0 - \pi}{\Gamma_0} \quad (5)$$

در این معادله، $\ln \pi^*$ و 0 به ترتیب نشان دهنده مقدار پارامتر بر روی سطح، حالت خالص و حالت بدون بعد می‌باشند. با استفاده از معادله ترمودینامیکی بین پتانسیل شیمیایی و ضریب اکتیویته خواهیم داشت:

$$RT \ln(\gamma_p x_p) = RT \ln \pi^* - \frac{\pi^0 - \pi}{\Gamma_0} \quad (6)$$

در روابط فوق، $\pi^* = \frac{\pi}{\pi^0}$ ، $\pi^0 = \sigma_1 - \sigma_p$ فشار کاهش یافته سطح، x_p و γ_p به ترتیب کسر مولی و ضریب فعالیت جزء ۲ در توده می‌باشند. ضریب فعالیت جزء ۲ با به‌کارگیری معادله NRTL از معادله زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$\ln(\gamma_p) = x_p^2 \left[\tau_{12} \left(\frac{G_{12}}{x_p + x_1 G_{12}} \right)^2 + \frac{G_{21} \tau_{21}}{(x_1 + x_p G_{21})^2} \right] \quad (7)$$

چنانچه معادله (۷) را در معادله (۶) جایگذاری کنیم سرانجام به معادله زیر می‌رسیم که می‌توان کشش سطحی مخلوط‌های دوجزئی مایع را به کمک آن محاسبه نمود:

$$\ln \left(\frac{\pi^*}{x_p} \right) = Z_0 (1 - \pi^*) + x_p^2 \left[\tau_{12} \left(\frac{G_{12}}{x_p + x_1 G_{12}} \right)^2 + \frac{G_{21} \tau_{21}}{(x_1 + x_p G_{21})^2} \right] \quad (8)$$

در این معادله $Z_0 = \frac{\pi^0}{\Gamma_0 RT}$ ضریب تراکم پذیری سطح در حالت اشباع می‌باشد و G_{12} ، G_{21} ، τ_{12} و τ_{21} پارامترهای قابل تنظیم مدل NRTL هستند.

بخش تجربی

ترکیب‌های دوجزئی گوناگون از آب، اتانول، استن، اتیل متیل کتون، نرمال هگزان، اتیل استات و دی اتیل اتر در آزمایشگاه تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند.

برای اندازه‌گیری کشش سطحی مخلوط‌های تهیه شده از دستگاه تانسومتر مدل Kruss K20 Easy Dyne استفاده شد. برای اندازه‌گیری کشش سطحی، این دستگاه ابتدا باید تراز می‌شد. سپس ۳۰ دقیقه قبل از شروع کار، روشن می‌شد تا با محیط به تعادل دمایی برسد. بنابراین آزمایش‌ها در دمای متوسط 25°C انجام شدند. برای اندازه‌گیری کشش سطحی از روش حلقه (Du Noüy Ring Method) استفاده شد.

محاسبه‌ی کشش سطحی با این روش بر پایه اندازه‌گیری بیشترین نیروی وزن مایع قابل حمل توسط حلقه بود. در واقع عمق فرو رفتن حلقه به داخل مایع یا متعاقب با آن، مقدار بر آمدن مایع از سطح، برای دست یافتن به مقدارهای بیشتری از نیرو بستگی نداشت. شایان گفتن است که زاویه‌ی تماس حلقه با سطح مایع باید صفر باشد و کلیه سطح آن به طور یکنواخت با سطح مایع تماس پیدا کند. قبل از انجام هر آزمایش نیز، حلقه و ظرف نمونه ویژه‌ی دستگاه، باید با آب مقطر و استن شسته شده و با گرما خشک می‌شدند (در صورت نیاز، حلقه روی شعله گاز تا حد سرخ شدن نگه داشته می‌شد). دقت این دستگاه در حدود $\pm 0.1 \text{ mN.m}$ بود و داده‌های قابل اعتمادی به دست آمد.

نتیجه‌ها و بحث

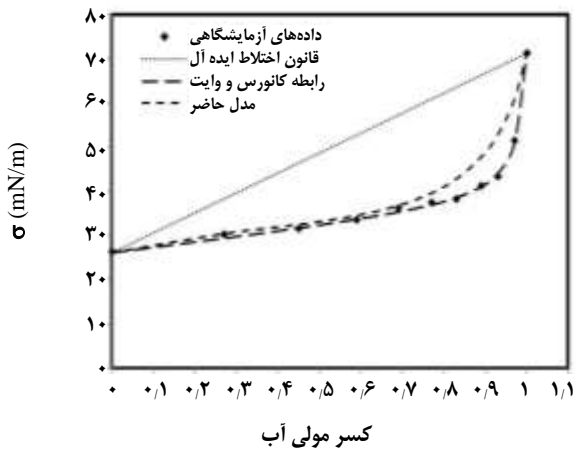
نتیجه‌های آزمایشگاهی به دست آمده در این کار و همچنین برخی از داده‌های آزمایشگاهی موجود در مقاله‌ها توسط سه قانون اختلاط (۱) قانون اختلاط ایده‌آل یعنی معادله $\sigma = \sum x_i \sigma_i$ ، (۲) قانون اختلاط کانورس و وایت و (۳) قانون اختلاط به دست آمده در این کار یعنی معادله‌ی (۷)، مورد ارزیابی قرار گرفتند. پارامترهایی قابل تنظیم روابط استفاده شده، با توجه به داده‌های آزمایشگاهی به کمک روش حداقل کردن مجموع مربع‌ها خطا تعیین شدند. در اینجا نتیجه‌ها در قالب دو بخش سامانه‌های آبی و سامانه‌های غیرآبی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

محلول‌های آبی

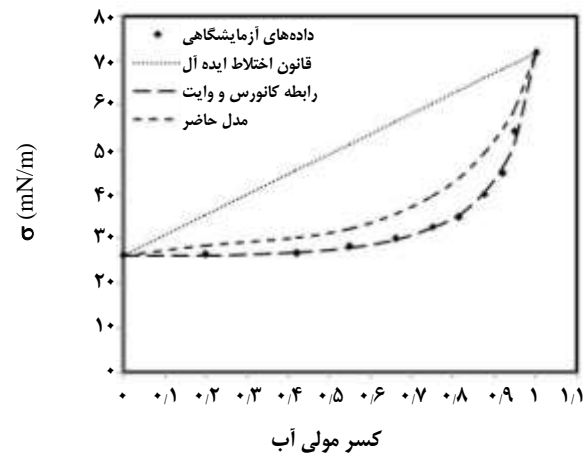
محلول‌های آبی که داده‌های آزمایشگاهی آنها در این کار به دست آمده است عبارتند از: محلول آب - اتانول، آب - استن

جدول ۱- پارامترهای قابل تنظیم مدل ارایه شده و مدل کانورس - وایت.

b	a	Z _i	τ_{21}	τ_{12}	G ₂₁	G ₁₂	پارامتر
							سیستم
۱,۴۴۵۱	۱,۱۷۶۲ -	۱,۰۵۰۰	۲,۲۸۷۰	۰,۱۸۸۲ -	۱,۶۵۲۹	۱,۰۵۸۷	آب - اتانول
۰,۷۳۹۱	۰,۹۷۸۴ -	۱,۰۹۹۸	۰,۹۷۴۹	۰,۵۴۷۰	۰,۷۴۸۶	۰,۸۵۰۰	آب - اسید استیک
۰,۹۵۱۳	۰,۹۵۸۰ -	۱,۰۸۶۰	۱,۲۸۸۰	۲,۲۳۰۵	۰,۴۷۰۱	۰,۲۷۰۶	آب - استن
۰,۹۸۳۱	۰,۹۸۲۰ -	۱,۰۶۴۱	۰,۰۶۸۴	۲,۸۴۱۴	۰,۹۸۸۳	۰,۶۱۴۰	آب - ۲- پروپانول
۰,۴۵۴۲	۰,۲۴۴۶ -	۰,۱۶۰۲	۰,۶۹۴۴	۰,۴۲۷۶	۰,۸۱۳۶	۰,۸۸۰۷	اتانول - دی اتیل اتر
۰,۷۳۷۹	۰,۸۸۱۴ -	۰,۶۸۱۳	۰,۶۹۴۴	۰,۴۲۷۶	۰,۷۲۶۲	۰,۸۵۲۱	۱,۴دی اکسان - نرمال هگزان
۰,۲۵۴۱	۰,۵۱۰۹ -	۰,۵۲۵۴	۱,۵۲۷۱	۰,۰۹۴۶	۰,۳۲۳۶	۰,۲۱۴۹	پروپیل استات - اتیل بنزن
۰,۰۱۴۶ -	۳,۴۸۶۶	۰,۲۰۷۵	۰,۷۷۶۵	۱,۱۶۶۶	۱,۲۷۴۱	۰,۶۹۴۹	اتیل استات - دی اتیل اتر



شکل ۲- سامانه آب - استیک اسید.



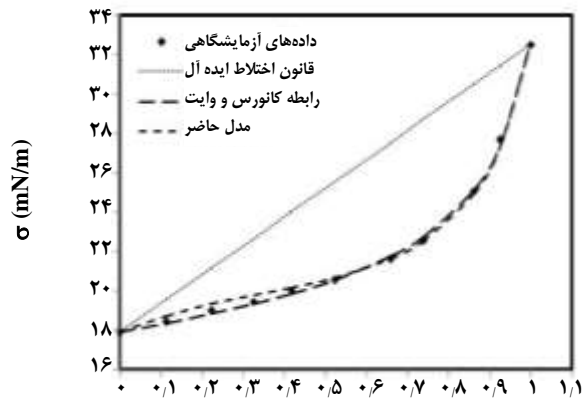
شکل ۱- سامانه آب - اتانول.

و همچنین مدل کانورس- وایت به کمک داده‌های آزمایشگاهی و با به‌کارگیری روش حداقل کردن مجموع مربعات خطا محاسبه و برای تمامی سامانه‌ها در جدول ۱ گزارش شده‌اند.

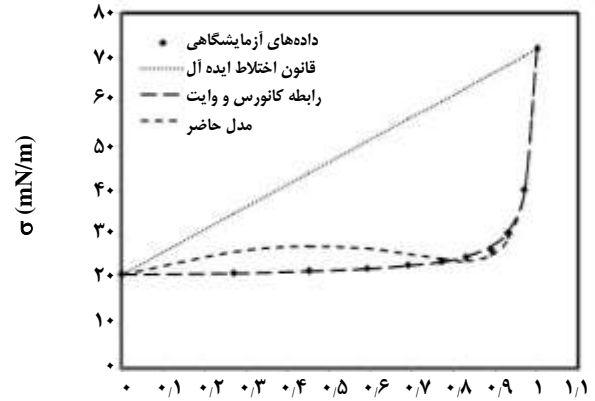
همان‌گونه که در شکل‌های ۱، ۳ و ۴ دیده می‌شود مدل کانورس و وایت توانسته به خوبی داده‌های آزمایشگاهی را پوشش دهد اما مدل ارایه شده در این کار در پیش بینی داده‌های آزمایشگاهی خطا نشان می‌دهد که بر اساس محاسبه‌ها، میزان خطای مطلق متوسط آن در مورد این سامانه‌ها (AAD)^(۱) نزدیک به ۱۰ درصد می‌باشد. علت این خطا وجود مولکول‌های الکل با پیوند هیدروژنی قوی است که یک سامانه غیرایده آل پیچیده با آب تشکیل داده و حتی به‌کارگیری مدل ضریب فعالیت NRTL توانسته از ایجاد این خطا

و محلول‌های آبی که داده‌های آزمایشگاهی آنها از مرجع [۹] اقتباس شده‌اند عبارتند از محلول آب- اسید استیک، آب - فرمیک اسید، آب - متانول، آب - ۱ - پروپانول، آب - ۲ - پروپانول. برای ارزیابی توانایی مدل ارایه شده، داده‌های آزمایشگاهی کشش سطحی محلول‌های آبی یاد شده و همچنین نتیجه‌های به دست آمده از به‌کارگیری دو مدل دیگر، با پیش‌بینی‌های مدل حاضر مورد مقایسه قرار گرفتند. در اینجا نتیجه‌ها مربوط به چهار سامانه آب - اتانول، آب - استن، آب - استیک اسید و آب - ۲- پروپانول به عنوان نمونه ارایه می‌شوند. داده‌های آزمایشگاهی مربوط به این سامانه‌ها همراه با نتیجه‌های به دست آمده از مدل‌ها در شکل‌های ۱ تا ۴ رسم شده‌اند. پارامترهای قابل تنظیم مدل ارایه شده

(1) Average Absolute Deviation



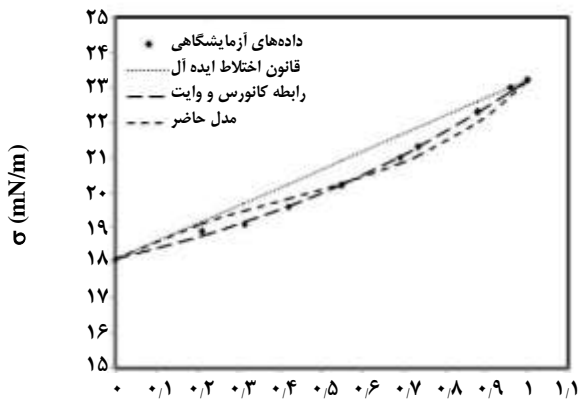
کسر مولی ۱ و ۴ - دی اکسان



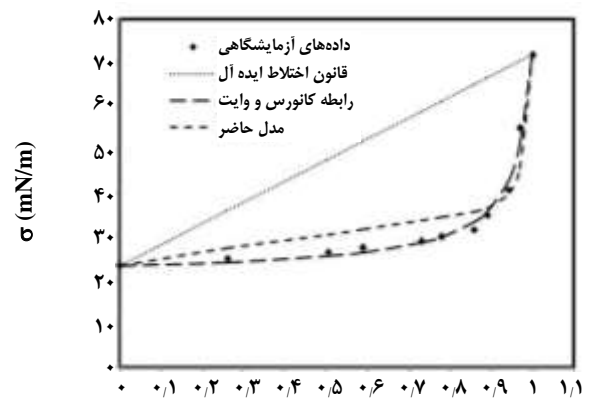
کسر مولی آب

شکل ۵- سامانه ۱،۴ دی‌اکسان - نرمال هگزان.

شکل ۳- سامانه آب - ۲- پروپانول.



کسر مولی اتانول



کسر مولی آب

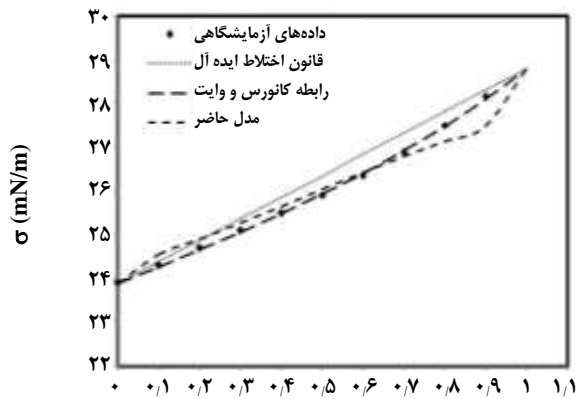
شکل ۶ - سامانه اتانول - دی اتیل اتر.

شکل ۴- سامانه آب - استن.

محلول‌های غیر آبی

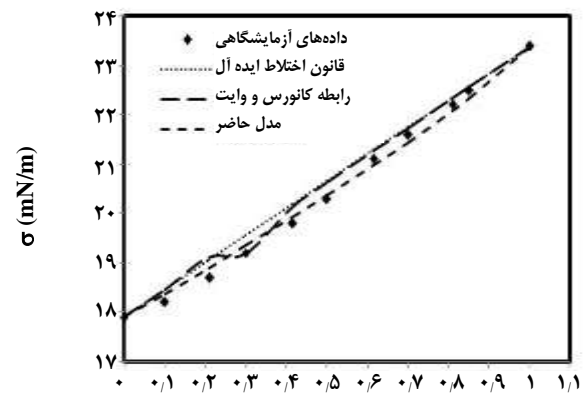
محلول‌های غیر آبی که داده‌های آزمایشگاهی آنها در این کار به دست آمده است عبارتند از: محلول اتانول- دی اتیل اتر، اتیل استات - دی اتیل اتر، اتیل متیل کتون - نرمال هگزان و محلول‌هایی که داده‌های آزمایشگاهی آنها از مراجع [۹، ۱۲] اقتباس شده عبارتند از محلول ۱ - ۴ دی‌اکسان - نرمال هگزان، ۱ - ۴ دی‌اکسان - نرمال هپتان، استونیتریل - اتانول، پروپیل استات - ۱ - اکسیلن، پروپیل استات - اتیل بنزن، ایزوبوتانول - دکانول. توانایی مدل در پیش‌بینی کشش سطحی مخلوط‌های غیر آبی با انتخاب چهار نمونه محلول غیر آبی از میان این مخلوط‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتیجه‌ها در شکل‌های ۵ تا ۸ رسم شده‌اند.

جلوگیری کند. ضمن اینکه ضریب برازش (R^2) برای سامانه‌های مذکور به طور متوسط ۰/۹۳۵ به دست آمد. در شکل ۲ داده‌های مربوط به سامانه آب - استیک اسید ترسیم شده است. متوسط خطای مطلق برای این سامانه در حدود ۶ درصد می‌باشد و همان‌گونه که دیده می‌شود مدل ارایه شده در این کار در حد قابل قبولی داده‌های آزمایشگاهی را پوشش داده است و این امر ناشی از نبود پیچیدگی زیاد این سامانه نسبت به سامانه‌های قبلی است و انحراف مدل از داده‌های آزمایشگاهی کمتر می‌باشد. ضریب برازش (R^2) برای این سامانه‌ها به طور متوسط ۰/۹۶۵ به دست آمد. همچنین برای همه سامانه‌ها دیده می‌شود معادله خطی قانون اختلاط ایده آل به هیچ وجه درست نیست.



کسر مولی اتیل بنزن

شکل ۸ - سامانه پروپیل استات- اتیل بنزن.



کسر مولی اتیل استات

شکل ۷ - سامانه اتیل استات- دی اتیل اتر.

مجموع مربع‌ها خطا محاسبه شدند. سپس با استفاده از پارامترهای محاسبه شده، مدل ارائه شده برای پیش‌بینی کشش سطحی مخلوطها مورد استفاده قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان دادند که مدل ارائه شده با دقت قابل قبولی می‌تواند داده‌های آزمایشگاهی مربوط به انواع محلول‌ها را در غلظت‌های گوناگون پوشش دهد. پیش‌بینی داده‌های مربوط به محلول‌های غیرآبی از دقت بالایی برخوردار بود به طوری که خطای متوسط مطلق برای این سامانه‌ها کمتر از ۱ درصد بوده است. برای سامانه‌های آبی نیز پیش‌بینی مدل قابل قبول می‌باشد و همان‌گونه که انتظار می‌رفت برای سامانه‌هایی با درجه غیرآئیده‌آلی زیاد، انحراف از داده‌های آزمایشگاهی نسبت به دیگر سامانه‌ها بیشتر است. به عنوان نمونه برای سامانه‌ی مانند اتانول- آب میزان خطای مطلق متوسط نزدیک به ۱۰ درصد می‌باشد.

همان‌گونه که دیده می‌شود برای سامانه‌های غیرآبی، مدل ارائه شده در این کار به خوبی داده‌های آزمایشگاهی را پیش‌بینی می‌کند به طوری که متوسط خطای مطلق و ضریب برازش (R^2) به دست آمده برای سامانه‌های اتانول- دی اتیل اتر و پروپیل استات - اتیل بنزن به ترتیب در حدود ۰/۸ درصد و ۰/۹۸۵ برای دو سامانه دیگر به ترتیب حدود ۰/۷ درصد و ۰/۹۸۹ می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله قانون اختلاط جدید برای پیش‌بینی کشش سطحی مخلوط‌های مایع، از ترکیب معادله گیبس-ولمر با مدل ضریب اکتیویته NRTL ارائه شد. برای بررسی توانایی مدل، کشش سطحی چندین سامانه دو جزئی مایع به طور آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه تانسیومتر مدل Kruss K20 Easy Dyne اندازه‌گیری شد. همچنین از داده‌های موجود در مقاله‌ها نیز برای ارزیابی قابلیت مدل، استفاده شد. پارامترهای قابل تنظیم مدل به کمک داده‌های آزمایشگاهی و با به‌کارگیری روش کمینه کردن

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۱۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۹/۱۱

مراجع

- [1] White F., "Fluid Mechanics", 5th Ed., McGraw-Hill Higher Education, (2003).
 [2] Reid R.C., Prausnitz J.M., Poling, 5th Ed., "The Properties of Gases and Liquids", McGraw-Hill, Chemical Engineering Series, (2001).

[۳] امانی، حسین؛ تولید بیوسورفکتانت‌های رامنولیبید به منظور کاربرد در فرایند ازدیاد برداشت نفت، نشریه شیمی

و مهندسی شیمی ایران، (۱) ۳۲: ۷۳ تا ۸۳ (۱۳۹۲).

- [4] Connors K.A., Wright J.L., [Dependence of Surface Tension on Composition of Binary Aqueous-Organic Solutions](#), *Annual Chemistry*, **61**: 194–198 (1989).
- [5] Vazquez G., Alvarez E., Navaza J.M., [Surface Tension of Alcohol + Water from 20 to 50 °C](#), *Journal of Chemical Engineering Data*, **40**: 611–614 (1995).
- [6] Azizian S., Hemmati M., [Surface Tension of Binary Mixtures of Ethanol + Ethylene Glycol from 20 to 50°C](#), *Journal of Chemical Engineering Data*, **48**: 662–663 (2003).
- [7] Rafati A.A., Ghasemian E., Abdolmaleki M., [Surface Properties of Binary Mixtures of Ethylene Glycol with a Series of Aliphatic Alcohols \(1-Pentanol, 1-Hexanol, and 1-Heptanol\)](#), *Journal of Chemical Engineering Data*, **53**: 1944–1949 (2008).
- [8] Tropea C., Yarin, A.L., Foss John F., "[Handbook of Experimental Fluid Mechanics](#)", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, (2007).
- [9] Li C., Wang W., [A Surface Tension Model for Liquid Mixtures Based on NRTL Equation](#), *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **9**(1): 45-50 (2001).
- [10] Brocos P., Pineiro A., Amigo A., Gracia-Fadrique J., [A Proposal for the Estimation of Binary Mixture Activity Coefficients from Surface Tension Measurements Throughout the Entire Concentration Range](#), *Fluid Phase Equilibria*, **260**: 343-353 (2007).
- [11] Prausnitz J.M., Lichtenthaler R.N., Edmundo Gomes de Azevedo, "[Molecular Thermodynamics of Fluid-Phase Equilibria](#)" 3rd Ed., Prentice-Hall, Inc. New Jersey (2007).
- [12] Penas A., Calvo E., Pintos M., Amigo A., Bravo R., [Refractive Indices and Surface Tensions of Binary Mixtures of 1,4-Dioxane Plus n-Alkanes at 298.15 K](#), *Journal of Chemical and Engineering Data*, **45**(4): 70- (2000).