

آموزشی بر مایعات یونی؛ بررسی خصوصیات و آینده آنها

مجتبی ساسانی^۱، افسانه ملاحسینی^{*}

^۱ تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده شیمی، گروه شیمی تجزیه، آزمایشگاه تحقیقاتی اسپکتروسکوپی، میکرو و نانو

استخراج

Email: amollahosseini@iust.ac.ir

ORCID: 0000-0002-6984-6157

چکیده

اخیراً مایعات یونی یا نمک‌های مایع توجه زیادی را به خود جلب کرده است. به واسطه خواص منحصر بفرد این مواد از آن‌ها به عنوان جایگزینی برای حلال‌های آلی استفاده می‌شود و سبب شده در اغلب حوزه‌های علم وارد شوند. این دسته از مواد در شیمی، علم مواد، مهندسی، فیزیک، داروسازی و انرژی بسیار مورد استفاده واقع شده است. از مهمترین این خصوصیات می‌توان به فشار بخار جزئی، غیرفرار بودن، هدایت الکتریکی بالا، گرانروی قابل تنظیم، پنجره الکتروشیمیایی وسیع و پایداری حرارتی اشاره کرد. کاربردهای صنعتی و آزمایشگاهی این ترکیبات در شیمی تجزیه بصورت خلاصه بررسی گردیده و در پایان آینده این ترکیبات در شیمی پیش بینی شده است.

واژگان کلیدی: آموزش مایعات یونی؛ خصوصیات؛ کاربردهای مایعات یونی؛ آینده مایعات یونی

مقدمه

مایعات یونی بدلیل خصوصیات گسترده و مطلوب، کاربردهای بسیار بیشتری از یک حلال داشته و در علوم مختلفی از جمله مواد، مهندسی شیمی، فیزیک، داروسازی، انرژی و شیمی استفاده می‌شوند. همچنین این دسته از حلال‌ها بدلیل پنجره الکتروشیمیایی وسیع بطور گسترده در الکتروشیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرفی مایعات یونی به عنوان محیط الکتروشیمیایی نیز بکار می‌روند و این بدان معنی است که اکسایش و کاهش مایعات یونی در محدوده وسیعی از پتانسیل رخ نمی‌دهد [۱-۳].

ساختار آنها دارای خواص منحصر به فردی می‌باشد. این مایعات به دلیل دارا بودن ساختار یونی قادرند ترکیبات یونی را به راحتی در خود حل کنند. از طرفی مایعات یونی نیز دارای بخش بزرگ آلی‌اند و این بدان معنی است که همزمان با حل کردن ترکیبات یونی، ترکیبات آلی را در خود حل می‌کنند پس می‌توان آنها را در دسته حلال‌های پرقدرتی طبقه بندی کرد [۴، ۵]. در مهندسی شیمی بسیار پرکاربرد می‌باشند و جزء حلال‌های ایمن محسوب شده و همچنین در سیستم‌های بیولوژیکی بطور ویژه برای استخراج گونه‌های هم نوع مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶].

مایعات یونی دسته‌ای از ترکیبات یونی‌اند که شبکه‌ای از یون‌ها را تشکیل می‌دهند و این در حالی است که آنها جامد نیستند و به شکل مایع و نمک می‌باشند. به بیانی دیگر مایعات یونی نمک‌هایی هستند که در دمای اتاق مایع‌اند، این ترکیبات اغلب زیر 100°C مایع هستند و با افزایش دما حالت خود را حفظ می‌کنند [۷].

در برخی منابع مایعات یونی را تحت عناوینی همچون مایعات یونی غیرآبی، نمک مذاب و نمک‌های ارگانیک مایع می‌شناسند. به این دلیل آن‌ها را نمک‌های ارگانیک مایع می‌نامند که عمدتاً یک بخش کاتیون آن‌ها آلی است و شامل یک آنیون معدنی یا آلی می‌باشند. این ترکیبات توانایی برقراری برهم کنش‌هایی از جنس الکترواستاتیکی دوقطبی-دوقطبی و پیوند هیدروژنی را دارد [۸، ۹]. عموماً مایعات یونی در دمای 180 تا 600 کلوین مایع و بسیار پایدار هستند. آن‌ها

فشار بخار نزدیک به صفر دارند بنابراین بخار نمی‌شوند. برخی از مایعات یونی را تحت عنوان مایعات یونی در دمای اتاق بررسی می‌کنند که در دمای محیط حدود 25°C الی 30°C مایع می‌باشند [۱۰].

در این مقاله سعی شده است که آموزشی بر مایعات یونی و بخشی از کاربردهای آن در شیمی تجزیه گردآوری شود. در ادامه آینده این ترکیبات نیز بصورت خلاصه بیان شده است.

تاریخچه

اتانول آمونیوم نیترات اولین مایع یونی بوده که در قرن ۱۹ سنتز شد و دمای ذوب 12°C داشت. از اینرو زیر دمای محیط این ترکیب مایع می‌باشد. پس از آن، در سال ۱۹۱۴ اولین مایع یونی در دمای اتاق به نام اتیل آمونیوم نیترات سنتز شد. از سال ۱۹۴۸ توسعه این ترکیبات بطور وسیعی آغاز گردید و از سال ۱۹۷۰ به بعد دو دسته از مایعات یونی پرکاربرد شامل آلکیل ایمیدازولیوم و آلکیل پیریدینیوم به بازار عرضه گردیدند. بعد از ۱۹۸۰، برای اولین بار از آن‌ها به عنوان محیط واکنش برای سنتز و همچنین به عنوان کاتالیست استفاده گردید. در سال ۱۹۹۲ استفاده از دو آنیون تترافلوروفسفات و تترافلوروبورات به عنوان آنیون‌های کاربردی شدت گرفت [۱۱، ۱۲].

خصوصیات ویژه مایعات یونی

مایعات یونی خصوصیات منحصر بفردی دارند که سبب شده در اکثر زمینه‌های علمی بطور ویژه مورد استفاده واقع شوند. ویژگی‌های این سری از ترکیبات در شکل ۱ نشان داده شده است. خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها به برهمکنش بین کاتیون و آنیون بستگی دارد. همچنین برهمکنش‌های الکترواستاتیکی به عوامل مختلفی مثل شعاع یون، ماهیت و طبیعت آن‌ها مربوط می‌باشد. از طرف دیگر، در این سری از ترکیبات برهمکنش‌های هیدروژنی نیز وجود دارد. همچنین عوامل ساختاری مثل تقارن یون، قطبیت، شاخه‌های استخلافی آلکیلی، ساختارهای شاخه‌ای یا حلقوی و گروه‌های عاملی در ایجاد خصوصیات مایعات یونی نقش بسزایی ایفا می‌کنند. برخی از خواص مهم مایعات یونی در زیر بحث شده است [۱۳، ۱۴].

چگالی مایعات یونی با افزایش اتم‌های کربن بطور منظم کاهش می‌یابد. از طرفی آنیون نیز بر چگالی ترکیب تأثیر می‌گذارد و این روند به گونه‌ای است که آنیون‌های فلئوئوردار تأثیر بیشتری در چگالی دارند و باعث افزایش چگالی خواهند شد [۱۷، ۱۸].

گرانروی^۱: به مقاومت در برابر حرکت گرانروی گفته می‌شود. عموماً مایعات یونی دارای گرانروی بیشتری نسبت به آب و حلال‌های مولکولی می‌باشند. ترکیبات فلئوئوردار برهمکنش‌های قوی‌تری ایجاد می‌کنند که سبب افزایش نیروی چسبندگی شده و گرانروی را افزایش می‌دهند. اما ترکیبات فلئوئوردار پاکسازی سختی داشته و قابلیت هم زدن کمی دارند. از طرفی ممکن است در صنعت بدلیل سختی جابجایی و پمپ کردن مشکلات زیادی را ایجاد کند [۱۹]. گرانروی، مستقیماً به نیروهای بین مولکولی باز می‌گردد. زنجیره آلکیلی غیرقطبی بوده و دارای نیروهای واندروالس می‌باشند. مقدار پخش بار در بررسی اثر گرانروی بسیار حائز اهمیت است زیرا باعث قویتر شدن نیروهای الکترواستاتیک می‌شود. هرچه پخش بار بیشتر باشد سبب افزایش گرانروی ترکیب می‌شود. از طرفی گرانروی با افزایش دما کاهش می‌یابد که می‌تواند به دلیل افزایش تحرک یون‌ها باشد [۲۰، ۲۱].

کشش سطحی: کشش سطحی خصیصه‌ای در مایعات است که سبب می‌شود لایه بیرونی آن‌ها به صورت ورقه‌ای کشسان عمل کند. این همان خصوصیتی است که موجب ربایش دو سطح مایع به یکدیگر می‌شود؛ مانند دو قطره آب که همدیگر را می‌ربایند و قطره بزرگ‌تری می‌سازند. کشش سطحی عامل بسیار مهمی است، هرگاه بخواهیم از مایعات یونی به عنوان کاتالیست استفاده کنیم می‌بایست کشش سطحی آنها را بررسی کنیم. این پارامتر بر روی برهمکنش‌های سطح مایع، گرانروی و خاصیت انحلال پذیری مایعات یونی تأثیرگذار است. کشش سطحی مایعات یونی از آب کمتر بوده اما از حلال‌های آلی معمولی بیشتر است [۲۲، ۲۳]. هنگامی که



شکل ۱- خصوصیات ویژه مایعات یونی

هدایت الکتریکی: از آنجایی که مایعات یونی دارای یون‌های متحرک، ساختارهای رزونانسی و قابلیت انتقال الکترون می‌باشند از هدایت الکتریکی بالایی برخوردارند بنابراین می‌توان از آن‌ها در سیستم‌های الکتروشیمیایی به عنوان محیط واکنش استفاده نمود. همچنین در باطری‌ها نیز می‌توان بطور گسترده از آنها استفاده کرد. هدایت مایعات یونی در حالت عادی از یک ترکیب یونی کمتر است ولی نکته مورد توجه در این دسته از ترکیبات این است که آنها در دماهای بالا هدایت الکتریکی بالایی دارند [۱۵، ۱۶].

چگالی: بصورت جرم واحد حجم تعریف می‌شود. مایعات یونی چگالی‌های عمدتاً سنگین‌تر از آب دارند. چگالی به چندین عامل نظیر اندازه حلقه، طول زنجیره آلکیلی در کاتیون، تقارن یون و نیروهای بین آنیون و کاتیون بستگی دارد. از طرفی چگالی بر روی خصوصیات انحلال نیز تأثیرگذار است. بطور کلی، اگر روی زنجیره آلکیلی گروه عاملی استخلاف شده باشد، چگالی افزایش خواهد یافت زیرا گروه عاملی باعث افزایش برهمکنش‌ها می‌شود. مطالعات نشان داده است که

^۱ ویسکوزیته

فاز ساکنی که در کروماتوگرافی به خصوص کروماتوگرافی گازی بکار می‌رود می‌بایست پایدار حرارتی باشد. از طرفی این ماده باید دمای جوش بالا داشته باشد. مایعات یونی به دلیل دارا بودن فشار بخار تقریباً برابر با صفر، تبخیر نشده و بنابراین می‌توانند بعنوان پوشش ستون های کروماتوگرافی بخوبی مورد استفاده واقع شوند.

چنانچه فاز ساکن پایدار حرارتی نباشد تخریب ستون رخ می‌دهد بدین معنا که با تغییر شرایط ستون مخصوصاً دما، جزئی از ستون جدا و خارج شده و بنابراین عمر ستون کاهش می‌یابد. اگر آنیون‌ها و کاتیون‌ها را متفاوت انتخاب کنیم پایداری ستون می‌تواند خیلی متفاوت باشد. آنیون‌های هالوژن دار پایداری حرارتی خوبی ندارند یعنی می‌توانند به راحتی تخریب شوند.

بیشترین گر انرژی مربوط به مایعات یونی همراه با آنیون هالید می‌باشند اما متاسفانه این ترکیبات پایداری دمایی خوبی ندارند. مشکل دیگر استفاده از این ترکیبات این است که می‌تواند سبب برهمکنش‌های خیلی قوی شوند. بعنوان مثال در صورت ایجاد پیوند هیدروژنی، یکسری برهمکنش ناشناخته ایجاد شده که باعث ایجاد خطا در نتیجه می‌شود. بعلاوه اینکه در چنین شرایطی این عامل سبب کاهش تفکیک می‌شود. مشکل دیگر در استفاده از آنیون‌های هالید بعنوان فاز ساکن ستون، خاصیت هیگروسکوپی آن‌هاست که ممکن است باعث هیدرولیز ستون شوند و بنابراین این ستون‌ها اولویت نخواهند بود.

در ستون‌های لوله‌باز دیواره اندود می‌بایست: ۱- فاز ساکن ویسکوزیته بالایی داشته باشد، ۲- فاز ساکن باید همانند فاز پیوسته وجود داشته باشد (عدم تشکیل قطره)، ۳- تخریب نشود، ۴- جاذب آب نباشد و در نهایت ۵- برهم کنش اضافه تولید نکند. بنابراین با توجه به اینکه مایعات یونی توانایی سنتز به جهت ایجاد یک ترکیب با گر انرژی قابل تنظیم را دارند، می‌توان انواع متنوع از ستون‌ها را با استفاده از آنها ایجاد کرد [۳۱، ۳۲].

کاربرد مایعات یونی در فرآیند استخراج

کشش سطحی یک حلال زیاد باشد مانع از انحلال حل شونده در حلال می‌شود و بنابراین از ویژگی حلال کاسته می‌شود. به جهت کاهش کشش سطحی از دو رویکرد استفاده می‌شود: (۱) افزایش دما

(۲) استفاده از ماده‌های فعال سطح [۲۴].

اثر هیگروسکوپی: مایعات یونی به ویژه مایعات یونی فلئوئودار از خود خاصیت هیگروسکوپی (نم پذیر) نشان می‌دهند. این سری از ترکیبات جاذب آب می‌باشند به این معنی که حتی اگر آب به صورت بخار هم باشد می‌توانند آن را جذب نمایند. این خاصیت در برخی موارد می‌تواند مزیت و در عین حال می‌تواند یک عیب اساسی به حساب آید. از طرفی هنگامی که یک مایع یونی به عنوان محیط یک واکنش انتخاب می‌شود ممکن است با جذب آب از محیط، واکنش به سمت تخریب واکنش یا واکنش گاه پیش برود. همچنین جذب آب امکان دارد سبب ایجاد یک سری واکنش اضافی بر روی مایعات یونی شود و از این طریق منجر به تخریب این ترکیب می‌گردد [۲۵، ۲۶].

کاربردهای مایعات یونی

از کاربردهای وسیع مایعات یونی نمی‌توان چشم پوشی کرد. امروزه مایعات یونی در اغلب بخش‌های علوم به دانشمندان کمک می‌کنند. یکی از مهمترین کاربردهای این دسته از مواد استفاده بعنوان فاز ساکن در انواع کروماتوگرافی می‌باشد. از طرفی به کاربردهای آنها در فرآیند استخراج به عنوان حلال سبز نیز می‌توان اشاره کرد [27].

استفاده از مایعات یونی به عنوان فاز ساکن در کروماتوگرافی: فاز ساکن در کروماتوگرافی می‌بایست دارای ویژگی‌هایی همچون پایداری حرارتی بالا، گر انرژی بالا و کشش سطحی زیاد باشد. با توجه به مطالب بیان شده، مایعات یونی تمامی ویژگی‌های مورد نظر را داشته و بنابراین قابلیت استفاده از این ترکیبات به عنوان یک فاز ساکن در کروماتوگرافی وجود دارد. فاز ساکنی که در کروماتوگرافی مورد استفاده واقع می‌شود اغلب به دو شکل قرار می‌گیرند: لوله‌باز دیواره اندود (WCOT) یا پر شده (Packed) [28-30].

تفاوت میکرواستخراج مایع-مایع پخشی^۴ (DLLME) در مقایسه با میکرواستخراج تک قطره این می‌باشد که در میکرواستخراج تک قطره حلال استخراجی وجود دارد که ساکن است و استخراج تحت تأثیر نفوذ گونه‌ها از توده محلول به تک قطره است در صورتی که در میکرواستخراج مایع-مایع پخشی یک تک قطره در کل محلول پخش می‌شود و سطح تماس آن زیاد می‌گردد. این تکنیک نیز توانایی استفاده از حلال‌هایی مثل مایعات یونی را دارا می‌باشد [۳۹].

آینده مایعات یونی

تا پایان سال ۲۰۲۰، نزدیک ۱۰۰ هزار مقاله علمی در زمینه مایعات یونی منتشر شده و ۱۷۰۰۰ درخواست ثبت اختراع بر روی مایعات یونی ارسال شده است. بسیاری از نشانه‌ها وجود دارد که مایعات یونی به یک داستان موفقیت تجاری تبدیل می‌شود. تحولات اخیر بازار باعث شده است تعداد طرح‌های تجاری به ثبت رسیده بوسیله مایعات یونی، از ۱۳ مورد در سال ۲۰۰۸ به عدد ۵۷ در سال ۲۰۱۹ برسد. پیشبینی می‌شود که گردش مالی حاصل از این طرح‌ها به اندازه بودجه تجاری یک کشور صنعتی باشد و همچنین در ده سال آینده جهش شدیدی در بکارگیری دانش مربوط به علوم مواد و شیمی منجر به انفجار شدیدی در صنعتی سازی و ایجاد طرح‌های صنعتی بر پایه مایعات یونی ایجاد شده و مایعات یونی با درخواست‌های شدیدی روبه رو خواهد شد [۴۰].

از طرفی با سنتز مایعات یونی متفاوت و جدید با خصوصیات متنوع انتظار می‌رود کاربرد این مواد در ساخت باتری‌های یون لیتیم، مفاهیم دارورسانی، روش‌های آماده سازی نمونه، غشاهای نانوفایبری، ساخت سیستم‌های ذخیره نیرو و بسیاری از حوزه‌های متنوع دیگر در شیمی و علوم دیگر گسترش یابد. با توجه به اینکه در سال ۲۰۲۰ مقاله‌ای با عنوان فعالیت ضد سرطانی داروی روتین همراه با مایعات یونی به چاپ رسیده است، پیشنهاد بررسی سایر مایعات یونی در امر دارورسانی و بررسی اثربخشی آنها بر روی سلول‌های سرطانی داده می‌شود.

مرحله آماده سازی نمونه یک مرحله اساسی در شیمی تجزیه است که معمولاً شامل یک روش استخراج است و منجر به جداسازی و غنی سازی آنالیت در ماتریس نمونه می‌شود. استخراج می‌تواند از نظر میزان انتخاب پذیری، سرعت و راحتی متفاوت باشد. با معرفی تکنیک‌های جدید استخراج، علاقه مندی بیشتری به تحقیقات در زمینه آماده سازی نمونه ایجاد شده است. اخیراً استفاده از مایعات یونی در فرآیند استخراج به شدت توسعه یافته است [۳۳].

در استخراج مایع-مایع^۱ (LLE) یک فاز آبی و یک فاز آلی وجود دارد که از اختلاط این دو حلال غیر قابل امتزاج، فرآیند استخراج حاصل می‌شود. به دلیل اینکه مایعات یونی توانایی برهمکنش‌های غیر قطبی و یونی دارند، می‌توانند برای جداسازی بسیاری از ترکیبات استفاده شوند. از فرآیند استخراج مایع-مایع می‌توان برای استخراج یون فلزی، مولکول آلی و ترکیب بیولوژیکی استفاده نمود [۳۴]. از معایب این تکنیک می‌توان به زمان بر بودن، طاقت فرسا بودن و مصرف زیاد حلال اشاره کرد. بنابراین این تکنیک جایگزین میکرواستخراج فاز مایع^۲ (LPME) شده است و این روش با استفاده از مایعات یونی بدلیل گرانیوی بالا و فشار بخار اندک، توانایی سازگاری با انواع فازهای متحرک مربوط به کروماتوگرافی مایع با کرائی بالا را دارد [۳۵, ۳۶].

از طرفی میکرواستخراج تک قطره^۳ (SDME) نیز با مایعات یونی مورد استفاده واقع شده است. در این تکنیک یک قطره حلال آلی از نوک یک سرنگ آویزان شده و در معرض حلال واقع می‌شود. در میکرواستخراج تک قطره همه انواع حلال‌ها قابلیت استفاده ندارند، حلال می‌بایست غیر قابل امتزاج با آب باشد. از طرفی چون بیشتر اوقات مشکل تبخیر قطره فاز استخراجی وجود دارد، می‌بایست از حلال‌هایی با خاصیت‌هایی همچون دمای جوش بالا، فشار بخار اندک و پایدار حرارتی استفاده نمود. این خصوصیات در مایعات یونی وجود دارد [۳۷, ۳۸].

¹ Liquid-liquid extraction

² Liquid phase microextraction

³ single drop microextraction

⁴ Dispersive liquid liquid microextraction

مناسب برای غشاهای جداسازی می‌تواند فلزات سنگین را از منابع آب آلوده حذف کند. از طرف دیگر، مایعات یونی به عنوان حلال استخراجی در جداسازی یون‌های فلزات سنگین عملکرد خوبی را نشان دادند. با پیشرفت تکنولوژی، سیستم‌های غشایی ساده‌تر و کارآمدتر مورد نیاز است تا از راندمان و قابلیت اطمینان سیستم تصفیه برای از بین بردن یون‌های فلزی سنگین اطمینان حاصل شود [۴۲].

بحث و نتیجه‌گیری

این مقاله آموزشی در رابطه با مایعات یونی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آنها صحبت کرده است. خواص آنها سبب شده است کاربرد آنها فراتر از یک حلال باشد. با این حال مهمترین نقش مایعات یونی کاربرد آنها بعنوان یک حلال سبز در واکنش‌ها به جای حلال‌های فرّار می‌باشند. کاربردهای صنعتی و آزمایشگاهی مایعات یونی در زمینه شیمی تجزیه بطور خلاصه گردآوری شده است و در نهایت آینده این سری از ترکیبات پیش بینی شده است.

منابع

۱. Ghandi, K., *A review of ionic liquids, their limits and applications*. Green and sustainable chemistry, 2014. **2014**.
۲. Lei, Z., et al., *Introduction: ionic liquids*. Chemical Reviews, 2017. **117**(10): p. 6633-6635.
۳. Pena-Pereira, F. and J. Namieśnik, *Ionic liquids and deep eutectic mixtures: sustainable solvents for extraction processes*. ChemSusChem, 2014. **7**(7): p. 1784-1800.
۴. Caminiti, R. and L. Gontrani, *The structure of ionic liquids*. 2013: Springer.
۵. Johnson, K.E., *What's an ionic liquid?* The Electrochemical Society Interface, 2007. **16**(1): p. 38.
۶. Werner, S., M. Haumann, and P. Wasserscheid, *Ionic liquids in chemical engineering*. Annual review of chemical and biomolecular engineering, 2010. **1**: p. 203-230.
۷. Rogers, R.D. and K.R. Seddon, *Ionic liquids--solvents of the future?* Science, 2003. **302**(5646): p. 792-793.

روتین یک فلاونوئید که به طور گسترده در منابع طبیعی، از جمله میوه‌ها (به عنوان مثال سیب، انگور و لیمو)، سبزیجات (به عنوان مثال، هویج، سیب زمینی) و نوشیدنی‌ها (به عنوان مثال چای) یافت می‌شود، که به دلیل پتانسیل درمانی آن برجسته شده است. بسیاری از مطالعات چندین خاصیت دارویی روتین را نشان داده‌اند، از جمله آن‌ها می‌توان به خاصیت ضد التهابی، آنتی اکسیدانی، ضد دیابتی، ضد میکروبی و ضد سرطانی آن اشاره کرد، مطالعات قبلی نشان می‌دهد که روتین قادر به کاهش رشد تومور در چندین مدل سلول آزمایشگاهی است با وجود پتانسیل دارویی این ترکیب دوتایی، کاربرد آن همچنان یکی از نگرانی‌های اصلی است زیرا روتین قادر به جذب در شکل اصلی خود نیست. در عوض، آن را به کوئرستین هیدرولیز می‌کند، که سپس جذب می‌شود، علاوه بر این، حلالیت پایین روتین باعث اختلال در دسترسی و فرمولاسیون آن در سیستم‌های دارورسانی می‌شود [۴۱].

چندین استراتژی برای افزایش قابلیت حلالیت داروهای ضعیف محلول استفاده شده است. در طی چند سال گذشته، برخی از مطالعات نشان داده‌اند که مایعات یونی در افزایش قابلیت حلالیت داروها تأثیر مثبت دارند.

از سوی دیگر مایعات یونی به عنوان حلال‌های سبز در شیمی بسیار کاربرد دارند و از آنجایی که آنها گرانیوی قابل تنظیم دارند بنابراین قابلیت ترشوندگی خوبی برای غشاهای متنوع خواهند داشت. بنابراین بررسی این مایعات بر روی غشاهای ساخته شده برای فرآیندهای استخراج غشایی می‌تواند اهمیت این مواد را در شیمی تجزیه به اثبات برساند.

با توجه به رشد سریع جمعیت انسانی و شهرنشینی، نگرانی‌های مربوط به آلودگی آب برای بسیاری از مناطق خصوصاً در کشورهای در حال توسعه به یک مسئله مهم تبدیل شده است، بنابراین روشی کارآمد و مقرون به صرفه برای تصفیه آب بویژه حذف فلزات سنگین نیازی فوری به حساب می‌آید. فلزات سنگین تهدیدهای جدی را برای سلامتی انسان و کشاورزی به وجود می‌آورند زیرا آنها غیر قابل تخریب هستند و احتمالاً در محیط زیست جمع می‌شوند. قابلیت میکروفیلتراسیون کارآمد به عنوان طرحی

- Valderrama, J.O., L.F. Cardona, and R.E. Rojas, *Correlation and prediction of ionic liquid viscosity using Valderrama-Patel-Teja cubic equation of state and the geometric similitude concept. Part I: pure ionic liquids*. Fluid Phase Equilibria, 2019. **497**: p. 164-177. .۱۹
- Salanne, M., et al., *Conductivity–viscosity– structure: Unpicking the relationship in an ionic liquid*. The Journal of Physical Chemistry B, 2007. **111**(18): p. 4678-4684. .۲۰
- Sanchez, L.G., et al., *Density, viscosity, and surface tension of synthesis grade imidazolium, pyridinium, and pyrrolidinium based room temperature ionic liquids*. Journal of Chemical & Engineering Data, 2009. **54**(10): p. 2803-2812. .۲۱
- Tariq, M., et al., *Surface tension of ionic liquids and ionic liquid solutions*. Chemical Society Reviews, 2012. **41**(2): p. 829-868. .۲۲
- Law, G. and P.R. Watson, *Surface tension measurements of N-alkylimidazolium ionic liquids*. Langmuir, 2001. **17**(20): p. 6138-6141. .۲۳
- Khaleduzzaman, S., et al., *Effect of particle concentration, temperature and surfactant on surface tension of nanofluids*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013. **49**: p. 110-114. .۲۴
- Maiti, A., A. Kumar, and R.D. Rogers, *Water-clustering in hygroscopic ionic liquids—an implicit solvent analysis*. Physical Chemistry Chemical Physics, 2012. **14**(15): p. 5139-5146. .۲۵
- Wippermann, K., J. Giffin, and C. Korte, *In Situ determination of the water content of ionic liquids*. Journal of The Electrochemical Society, 2018. **165**(5): p. H263. .۲۶
- Ding, J., T. Welton, and D.W. Armstrong, *Chiral ionic liquids as stationary phases in gas chromatography*. Analytical Chemistry, 2004. **76**(22): p. 6819-6822. .۲۷
- Janz, G.J., *Molten salts handbook*. 2013: Elsevier. .۸
- Shi, X., L. Qiao, and G. Xu, *Recent development of ionic liquid stationary phases for liquid chromatography*. Journal of chromatography A, 2015. **1420**: p. 1-15. .۹
- Marsh, K.N., J.A. Boxall, and R. Lichtenthaler, *Room temperature ionic liquids and their mixtures—a review*. Fluid phase equilibria, 2004. **219**(1): p. 93-98. .۱۰
- Wilkes, J.S., *A short history of ionic liquids—from molten salts to neoteric solvents*. Green Chemistry, 2002. **4**(2): p. 73-80. .۱۱
- Lui, M.Y., et al., *Salts dissolved in salts: ionic liquid mixtures*. Chemical Science, 2011. **2**(8): p. 1491-1496. .۱۲
- Xu, W., E.I. Cooper, and C.A. Angell, *Ionic glass liquids: ion mobilities, temperatures, and fragilities*. The Journal of Physical Chemistry B, 2003. **107**(25): p. 6170-6178. .۱۳
- Kondo, Y., T. Koyama, and S. Sasaki, *Tribological properties of ionic liquids*. Ionic liquids-New aspects for the future, 2013. .۱۴
- Wishart, J.F. and E.W. Castner, *The physical chemistry of ionic liquids*. The Journal of Physical Chemistry B, 2007. **111**(18): p. 4639-4640. .۱۵
- Armand, M., et al., *Ionic-liquid materials for the electrochemical challenges of the future*. Materials for sustainable energy: collection of peer-reviewed research and review articles from Nature Publishing Group, 2011: p. 129-137. .۱۶
- Deetlefs, M., K.R. Seddon, and M. Shara, *Predicting physical properties of ionic liquids*. Physical Chemistry Chemical Physics, 2006. **8**(5): p. 642. .۱۷
- Valderrama, J.O. and K. Zarricueta, *A simple and generalized model for predicting the density of ionic liquids*. Fluid Phase Equilibria, 2009. **275**(2): p. 145-151. .۱۸

- Vidal, L., et al., *An ionic liquid as a solvent for headspace single drop microextraction of chlorobenzenes from water samples*. *Analytica chimica acta*, 2007. **584**(1): p. 189-195. .۳۷
- Aguilera-Herrador, E., et al., *Direct coupling of ionic liquid based single-drop microextraction and GC/MS*. *Analytical Chemistry*, 2008. **80**(3) p. 793-800. .۳۸
- Rykowska, I., J. Ziemblińska, and I. Nowak, *Modern approaches in dispersive liquid-liquid microextraction (DLLME) based on ionic liquids: A review*. *Journal of molecular liquids*, 2018. **259**: p. 319-339. .۳۹
- Kalb, R.S., *Toward Industrialization of Ionic Liquids*, in *Commercial Applications of Ionic Liquids*. 2020, Springer. p. 261-282. .۴۰
- Caparica, R., et al., *Anticancer activity of rutin and its combination with ionic liquids on renal cells*. *Biomolecules*, 2020. **10**(2): p. 233. .۴۱
- Foong, C.Y., M.D.H. Wirzal, and M.A. Bustam, *A review on nanofibers membrane with amino-based ionic liquid for heavy metal removal*. *Journal of Molecular Liquids*, 2020. **297**: p. 111793. .۴۲
- Poole, C.F. and S.K. Poole, *Ionic liquid stationary phases for gas chromatography*. *Journal of separation science*, 2011. **34**(8): p. 888-900. .۲۸
- Nan, H. and J.L. Anderson, *Ionic liquid stationary phases for multidimensional gas chromatography*. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2018. **105**: p. 367-379. .۲۹
- Poole, C.F. and N. Lenca, *Gas chromatography on wall-coated open-tubular columns with ionic liquid stationary phases*. *Journal of Chromatography A*, 201۳. **۲۵۷**: p. 87-109. .۳۰
- Anderson, J.L. and D.W. Armstrong, *High-stability ionic liquids. A new class of stationary phases for gas chromatography*. *Analytical Chemistry*, 2003. **75**(18): p. 4851-4858. .۳۱
- Ragonese, C., et al., *Use of ionic liquids as stationary phases in hyphenated gas chromatography techniques*. *Journal of Chromatography A*, 2012. **1255**: p. 130-144. .۳۲
- Mollahosseini, A., *Application of reusable flat-membrane in electro-membrane extraction for tamsulosin hydrochloride determination in cleaning validation samples of sterile production line equipment by RP-HPLC*. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2021: p. 105793. .۳۳
- Sas, O.G., et al., *Liquid-liquid extraction of phenolic compounds from water using ionic liquids: Literature review and new experimental data using [C2mim] FSI*. *Journal of environmental management*, 2018. **228**: p. 475-482. .۳۴
- Han, D., et al., *Application of ionic liquid in liquid phase microextraction technology*. *Journal of separation science*, 2012. **35**(21): p. 2949-2961. .۳۵
- Mei, M., X. Huang, and L. Chen, *Recent development and applications of poly(ionic liquid)s in microextraction techniques*. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2019. **112**: p. 123-134. .۳۶