

مروری کوتاه بر نانوراکتورها: انواع و کاربرد

عبدالحمید دهقانی، میلاد قزلسفلو، لیا مرادی*

گروه شیمی آلی، دانشکده شیمی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده: یک دغدغه بسیار چالش برانگیز محققان در قرن اخیر همواره تولید مواد شیمیایی در مقیاس نانومتری بوده است و همسو شیمییدانان تلاش کرده اند تا درک کنند که چگونه اصول شیمیایی اساسی در زمانی که سیستم ها به فضاهایی با ابعاد نانو محدود می شوند، تغییر می کنند. بنابراین هدفی که مدت ها در علم نانو دنبال می شود این است که ماهیت ساختارها و عملکرد سیستم های بیولوژیکی پیچیده که توسط سلول ها پوشش داده می شوند، را با ایجاد نانو ساختارهای مصنوعی به شیوه ای منطقی به تصویر بکشد. بدین منظور راهبردهای متفاوتی پیشنهاد شده و مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. در این بین، نانوراکتورها به عنوان یک پدیده نوظهور و یک راهبرد عملی و علمی جدید برای تولید نانومواد مطرح شده اند. نانوراکتورها ماهیت شیمیایی پایه مولکول ها و مولکول های درون خود را تغییر می دهند و نحوه رفتار آنها را در واکنش های شیمیایی تغییر می دهند. در حقیقت نانوراکتورها محفظه های بسیار کوچکی با اندازه نانومتر هستند که از کاتالیزورها یا دارو که به عنوان مهمان در داخل ساختار نانوراکتور جایگذاری شده است در برابر تأثیرات محیطی محافظت کرده و واکنشگرها و کاتالیزورها را در فضایی کوچک به مدت طولانی محصور می کنند و در نتیجه پتانسیل زیادی برای بهبود فرآیندهای شیمیایی از خود نشان می دهند. نکته حائز اهمیت این است که علاوه بر انجام گستره وسیعی از واکنش های شیمیایی، فضای درون نانوراکتورها محیط مناسبی برای تولید نانو ساختارهای مختلف می باشد. در این مقاله، به طور خلاصه به معرفی نانوراکتورها و برخی از کاربردهای آن پرداخته می شود.

واژگان کلیدی: نانوراکتور، نانوراکتورهای خود آرا، نانوراکتورهای طبیعی و مصنوعی

l_moradi@kashanu.ac.ir

متخلخل با قطر در حدود دو میکرون و کمتر از آن اطلاق می شود. در حقیقت یک نانوراکتور از مهمانی که در داخل ساختار نانوراکتور قرار گرفته است، در برابر عوامل محیطی بیرونی محافظت می کند. در نتیجه باعث افزایش کارایی واکنش ها و فرآیندهای می شود [۱-۱۳]. در حقیقت برکسی پوشیده نیست که طبیعت، نانوکارخانه ای برای پیشبرد حیات و ممت را درون سلول های زنده جای داده است. با اینکه فاصله زیادی تا رسیدن به ساخت یک سلول کامل وجود دارد، اما سلول هایی مشابه که از خود آرای می واحد های سازنده ی زیستی و سنتزی ساخته می شوند، پیشرفت قابل چشم گیری داشته اند. درشت مولکول ها، درشت مولکول های زیستی و حتی مولکول ها، مزایای قابل توجهی در تشکیل

۱- مقدمه

یک مسئله بسیار چالش برانگیز برای محققان در قرن اخیر تولید مواد شیمیایی در مقیاس نانومتری بوده است. بنابراین راهبردهای متفاوتی پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از راهکارهای مورد توجه شیمییدانان استفاده از نانوراکتورها است. نانوراکتورها نوعی راکتور شیمیایی هستند که در حیطه نانوفناوری و نانوزیست فناوری قرار می گیرند. معمولاً نانو ساختارهای متخلخل که یک بعد آنها کمتر از یکصد نانومتر و یا محفظه هایی که قطری کمتر از پانصد نانومتر داشته باشند، به عنوان نانوراکتور شناخته می شوند. در یک دسته بندی کلی دیگر، نانوراکتورها به مواد

نانوراکتورهایی که بتوانند گونه‌ای را درون کپسول خود قرار دهند، از خود به نمایش گذاشته‌اند. لازم به ذکر است که با وجود این پیچیدگی‌ها، هر چقدر از واحدهای سازنده ی طبیعی مانند گونه‌های دوگانه دوست مبتنی بر آنزیم‌ها و ویروس‌ها بیشتر استفاده شود به هدف مدل سازی سامانه‌های طبیعی نزدیک‌تر می‌شویم [۱۴-۲۲].

۲- اهمیت نانوراکتورها

استفاده از نانوراکتورها مانند سایر نانو مواد دارای مزایای بی شماری نسبت به راکتورهای ماکروسکوپی می‌باشد. مهمترین این مزایا عبارتند از [۶-۸]:

- اعمال کنترل بیشتر بر انجام واکنش
- انتخاب پذیری
- جدا کردن مواد سمی و ناپایدار از محیط توده
- کاهش سمیت سیستم
- افزایش پایداری کاتالیزگر
- ایده آل بودن در فرایندهایی مانند دارورسانی هوشمند

به تازگی محققان موفق به ساخت نانوراکتورهایی شده‌اند که می‌توانند واکنش‌های چند مرحله‌ای را به صورت تک مرحله‌ای یا به عبارت دقیق‌تر تک ظرفی انجام دهند [۲۳-۲۶]. گام بعدی در فناوری نانوراکتور میل به سمت طراحی و ساخت دستگاه‌های مشابه سلول مصنوعی برای کاربردهایی شامل غربالگری و تشخیص بیماری است [۲۷-۲۸]. اثر ایزوتوپ جنبشی در یک مولکول منفرد در یک نانوراکتور مبتنی بر غشا در اصطلاح گیر می‌افتد. این پدیده‌ای است که توسط محققان در انگلستان در طی آزمایشات انجام شده در سپتامبر ۲۰۱۰ کشف شده است. اثر ایزوتوپ جنبشی، که در آن سرعت واکنش تحت تأثیر حضور یک اتم ایزوتوپی در محلول است، یک اصل مهم برای روشن سازی مکانیسم‌های واکنش است. این یافته اخیر می‌تواند روش‌های جدیدی را برای مطالعه واکنش‌های شیمیایی باز کند. این مطالعات حتی ممکن است به روند ساخت نانو راکتورهای جدید کمک کنند [۲۹-۳۱]. یکی از روش‌های هدایت آنزیم‌ها به این نانوراکتورها، اتصال فیزیکی آنها به انتهای پروتئین‌هایی است که

در پوسته نانوراکتورها شکل می‌گیرند. اما این کار، بسیار دشوار و چالش برانگیز است. قسمت انتهایی بیشتر پروتئین‌های پوسته به سوی خارج از نانوراکتور جهت گیری می‌کنند، بنابراین، هر مولکول یا آنزیمی که به انتهای این پروتئین‌ها متصل شود در نهایت روی سطح بیرونی نانوراکتور سنتز شده قرار می‌گیرد. به خصوص جدا نگه داشتن یک یا چند آنزیم در یک نانوراکتور از بقیه محیط سلولی بسیار دشوار و جدی به نظر می‌رسد. بنابراین می‌توان یک نانوراکتور مصنوعی را بر پایه یک پیش ماده طبیعی مانند پروتئین‌ها طراحی کرد. اخیراً در یک پژوهش، محققان پروتئینی به نام BMC-H را به‌عنوان پیش ماده سازنده یک نانوراکتور آنزیمی به کار گرفتند. آنها این پروتئین را با روشی معین به جابه‌جایی دایره‌ای، درون نانوراکتور قرار دادند، به طوری که سر آن به سمت داخل نانو راکتور جهت گیری کرده باشد. با این کار بخش انتهایی به سوی داخل نانوراکتور قرار می‌گیرد. این پروتئین مصنوعی شبیه به پروتئین طبیعی خواهد بود، با این تفاوت که انتهای آن به سوی داخل نانوراکتور است. بنابراین، این نانوراکتور سنتز شده با راکتور طبیعی تفاوت ساختاری و ابعادی زیادی ندارد و می‌توان از آن برای مقاصد زیست‌فناوری استفاده کرد. همچنین با استفاده از نانوبلورها، طی فرآیندهای ارزان می‌توان نانو راکتورهایی قدرتمند تولید کرد [۳۲-۳۳]. محققان این توانایی را دارند که از اختلاف زیاد در اجزای انتخاب شده برای ایجاد این نانوبلورها و نانوراکتورها استفاده کنند. از آسانترین و ارزاترین روش‌ها استفاده از نانو بلورها است که از قالب در فرآیند ایجاد ذرات توخالی استفاده می‌کند. ذرات کاتالیست به منظور جلوگیری از تجمع ذرات به داخل پوسته‌ها قرار داده می‌شوند. ورود انتخابی به محفظه کاتالیزگر احتمال تشکیل محصولات مورد نظر تحت واکنش‌های ثانویه را کاهش می‌دهد [۳۴-۳۹]. از نانوراکتورها همچنین می‌توان برای موارد بسیار زیاد دیگری نیز استفاده نمود از جمله می‌توان به کاربردهای زیر اشاره کرد [۳۵-۳۹]:

- تصفیه و پالایش آب
- ایجاد سوخت‌های آبی (که اساساً ۱۵٪ آب را در محصول دیزل تصفیه شده مخلوط می‌کند) که نقش مهمی در صنایع شیمیایی ایفا می‌کند.

- تولید محصولات نظیر لوسیون ها، کرم های دارویی، شامپوها، نرم کننده ها، ژل های دوش، و خوشبو کننده ها
- بهبود کیفیت صنایع غذایی و آشامیدنی (سس ها، پوره ها، پایه های پخت سوپ، امولسیون نوشیدنی های غیر الکلی و سس های سالاد)

کیفیت کالاهای زیبایی و سلامت مانند لوسیون ها و شامپوها را می توان با استفاده از مخلوط کردن با آب و ایجاد امولسیون فوری، بهبود بخشید. این امولسیون ها که با ذرات کوچکتر عرضه می شوند، انتظار می رود که ماندگاری بیشتری داشته و هنگام فروش در خرده فروشی ها ظاهر زیبایی داشته باشند.

همچنین، برطرف کردن نیازهای صنایع غذایی و آشامیدنی می تواند منجر به کاهش هزینه های فرآوری، فضای بیشتر، کارایی بهتر و تجهیزات کمتری شود. در نهایت این امر ممکن است هزینه غذا و نوشیدنی را برای مصرف کنندگان کاهش دهد.

از طرف دیگر، علاوه بر تأمین سوخت اکثر قایق ها و کشتی ها، از سوخت هیدرولیکی می توان برای حمل و نقل سنگین، قطارها و تجهیزات زمینی (از جمله بولدوزر) استفاده کرد. کاهش آلودگی و افزایش بهره وری سوخت ممکن است از سوخت های آبی تولید شده توسط نانوراکتور حاصل شود.

همچنین افزایش استفاده از انرژی های تجدیدپذیر نیز به کمک نانوراکتورها ممکن است به بهبود محیط زیست در جهان کمک کند.

بنابراین و به طور خلاصه، با توسعه سریع علوم نانو و فناوری نانو، انواع مختلف نانوراکتورهای کاربردی برای کاربردهای متنوع طراحی شده اند. تحولات بسیاری در طراحی منطقی نانوراکتورها برای سنتز شیمیایی و کاربردهای زیست پزشکی رخ داده است. در حقیقت اهمیت نانوراکتورها از آنجا حاصل می شود که وجود نانوراکتورها فضای محدودی را که از محیط اطراف جدا شده فراهم می کند. و از طرفی هنگامی که سیستم واکنش در فضای نانومتری محدود شود، دانشمندان متعهد به مطالعه تغییرات واکنش های شیمیایی هستند. به طور کلی نانوراکتورها سرعت واکنش را تسریع می کنند و حتی مکانیسم برخی از واکنش های شیمیایی را تغییر می دهند. سلول ها و اندامک ها به عنوان نانوراکتورهای طبیعی نیز

بسیار مورد توجه هستند. از طرفی توسعه سنتز داخل سلولی امکان تحقق کاربردهای مختلف در زیست پزشکی برای نانوراکتورها را فراهم می کند [۳۵-۳۹].

۳- دسته بندی نانوراکتورها

به طور کلی نانوراکتورها را می توان به دو گروه نانوراکتورهای طبیعی و سنتزی تقسیم بندی کرد. نانوراکتورهای طبیعی عملکردی انتخاب پذیرتر و در عین حال ساختاری پیچیده تر دارند. نانوراکتورهای طبیعی شامل میکرو محفظه های پروتئینی باکتریایی، قفس های پروتئینی و ویروس ها می باشند. ضمن اینکه، که نانوراکتورهای سنتزی دارای تنوع بیشتر ساختاری و ساختمانی ساده تر نسبت راکتورهای طبیعی هستند. نانوراکتورهای سنتزی شامل مولکول ها، درشت-مولکول ها، نانوساختارها، مواد جامد متخلخل و ... می باشند [۴۳-۴۵].

۳-۱- نانوراکتورهای طبیعی

ایده آل ترین نانوراکتورها، سلول ها و اندامک های سلولی هستند که دارای غشاهای لیپیدی هستند و انتخاب پذیری بالایی از خود نشان می دهند. به این صورت که تنها به مولکول های خاصی اجازه ی ورود به حفره ی داخلی خود را می دهند و بین مولکول های مختلف تمایز قائل می شوند. علاوه بر این، وجود منافذ وابسته به محرک های محیطی نظیر اسیدیته و بازیستیه (باز و بسته شدن در اثر تغییر اسیدیته محیط رخ می دهد)، سلول ها را نسبت سایر نانوراکتورها حساس تر کرده است. اگرچه گزینش پذیری و حساسیت بالا از ویژگی های بارز همه نانوراکتورهای طبیعی می باشد [۴۳-۴۵].

اولین دسته، محفظه های پروتئینی-باکتریایی هستند. میکرو محفظه های باکتریایی که به عنوان اندامک های پروتئینی در سلول های باکتریایی وجود دارند یک نوع از نانوراکتورهای طبیعی هستند که متشکل از پوسته ای با ساختاری چند وجهی از جنس پروتئین می باشند و قطری بین ۸۰ تا ۱۵۰ نانومتر دارند. این نوع نانوراکتورها حاوی چندین آنزیم مختلف هستند. کربوکسیزوم که در سیانوباکتری ها یافت می شوند، از این نوع میکرو محفظه ها هستند، که قطری در حدود ۵۰ نانومتر دارند (شکل ۱). این نوع از

نانوراکتورها عمدتاً در زمینه های زیستی به کار گرفته می شوند [۴۷-۴۶].



شکل ۱. ساختار یک میکرومحفزه های باکتریایی (کربوکسیزوم)

قفس های پروتئینی به عنوان دومین دسته از نانوراکتورهای طبیعی، کاربردهای غیر زیستی فراوانی را شامل می شوند. معروف ترین نوع این نانوراکتورها، فریتین ها هستند که دارای مورفولوژی کروی و اندازه های در حدود ۱۲ نانومتر با حفراتی به کوچکی ۸ نانومتر می باشند. در واقع فریتین ها، پروتئین ذخیره سازی آهن هستند و دارای هسته ی اکسید آهن (III) آبدار می باشند. وجود هسته اکسید آهن در فریتین ها باعث می شود که خواص کاتالیزوری بسیار جالب و شگفت انگیزی را از خود نشان دهند. بدین ترتیب قفس های پروتئینی برای ساخت نانوساختارها مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین این نانوراکتورها در احیای فوتوکاتالیزوری ترکیبات آلی و یون های فلزی بسیار کارآمد ظاهر شده اند [۴۸-۵۰].

دسته بعدی ویروس ها هستند. یک نانوراکتور بیوشیمیایی از جنس ویروس، صرفاً با باز کردن یک ویروس بیولوژیکی از طریق روش های علمی و سپس از بین بردن محتوای مضر آن و جمع آوری مجدد پوشش پروتئینی آن در اطراف یک مولکول آنزیم، ایجاد می شود [۶].

۳-۲- نانوراکتورهای سنتزی

پیچیده بودن و تنوع پایین نانوراکتورهای طبیعی باعث شده است که علیرغم خواص منحصر بفرد این نانوراکتورها، مولکول های سنتزی به عنوان نانوراکتورهای ساده تری که نسبت به انواع طبیعی آسان تر تهیه و کنترل می شوند مطرح شوند.

نانوراکتورهای مولکولی جزو این دسته محسوب می شوند. یک نانوراکتور مولکولی از تجمع تعدادی مولکول در کنار هم و تشکیل یک حفره، برای انجام واکنش شیمیایی تولید می شود. نانوراکتورهای مولکولی به طور کلی به سه دسته کپسول ها،

مایسل ها و وزیکول ها تقسیم می شوند. این نانوراکتورها به ویژه در دارورسانی هوشمند بسیار موفق ظاهر شده اند. همچنین این نانوراکتورها را می توان از اتصال کووالانسی سیکلودکسترین ها به مولکول های دیگر سنتز کرد که گزینش پذیری بسیار بالایی را از خود نشان می دهند. علاوه بر سیکلودکسترین ها، کالیکس آن ها با حفرات بسیار بزرگ نیز به عنوان نانوراکتورهای مولکولی عمل می کنند [۵۱-۵۲].

ساختارهای متخلخل سیلیکات ها، شبکه های آلی-فلزی و زئولیت ها نیز می توانند به عنوان نانوراکتور عمل کنند. این نانوساختارها به عنوان نانوراکتور در فرایندهای مختلفی نظیر فرایند پروتئین کافت، کاتالیز واکنش های اکسایش، هیدروژن دار کردن، تبدیل ایزومری کاتالیز شده با اسید، واکنش های تسهیم نامتناسب و سنتز نانوذرات مورد استفاده قرار می گیرند [۵۳-۵۴].

دسته بعدی نانوراکتورهای درشت مولکول هستند. تنوع ساختاری پلیمرها از لحاظ مونومرهای سازنده، جرم مولکولی، گروه های عاملی و شکل موجب شده است تا کاربردهای فراوانی داشته باشند. در زمینه نانوراکتور، پلیمرها به صورت درشت مولکول هایی منفرد با ساختار درونی خالی و به شکل ساختارهای خودآرا با یک یا چند حفره مورد استفاده قرار می گیرند. به طور کلی این نانوراکتورهای درشت مولکول شامل پلیمرزوم ها، هیدروژل ها، و نانوراکتورهای تک مولکولی می باشند. این نانوراکتورها کاربردهای فراوانی به خصوص در زمینه دارورسانی دارند. به عنوان مثال، از نانوراکتورهای تک مولکولی مایسل بر پایه سیکلودکسترین برای دارورسانی هوشمند به سلول های سرطانی استفاده می شود. این نانوراکتورها وابسته به pH عمل کرده و منجر به رهایش دارو صرفاً در داخل سلول های سرطانی می گردد. بنابراین این نانوراکتورها گزینش پذیری بسیار بالایی در مهار سلول های سرطانی دارند [۵۵-۵۷].

دسته جالب توجه دیگر، نانوراکتورهای بیولوژیکی هستند. استفاده از مولکول های بیولوژیکی، مجموعه ها و سیستم ها در سنتز نانومواد، که از تحقیقات روابط بین شاخه های زیست شناسی، شیمی و علوم مواد پدید آمده است، رویکرد جدیدی را به عنوان گزینه های جایگزین روش های رایج مصنوعی ارائه داده است. با استفاده از سیستم های بیومولکولی سازمان یافته مانند قفس های پروتئینی، کمپلکس های لیپیدی، لایه های S باکتریایی و

دئوکسی ریبونوکلیک اسید (DNA) می توان به آماده سازی، مونتاژ و تبلور مواد رسید. مطالعه و تحقیق در این زمینه مورد توجه روز افزون قرار گرفته است و چندین گزارش و مقاله مروری در این زمینه منتشر شده است. علاقه فعلی به این سیستم های زیستی از آنجا ناشی می شود که اصلاح آنها اغلب آسان است و در آنها خودآرایی به طور کاملاً مشخص رخ می دهد [۶۰-۵۸].

نانوراکتورهای خودآرا جزو دسته دیگر از راکتورها محسوب می شوند. کپسول های مولکولی خودآرا، ساختارهای سه بعدی هستند که از طریق فعل و انفعالات برگشت پذیر مانند پیوند هیدروژنی بین زیر واحدهای مکمل ایجاد می شوند. کپسول های مولکولی خودآرا بسیاری از مشکلات کپسول کووالانسی، مانند روش های ترکیبی چند مرحله ای و پیچیده و عدم تطبیق پذیری را برطرف می کنند. بنابراین، تحقیقات اخیر بر روی نانوراکتورهای خودآرا متمرکز شده است. مایسل ها، امولسیون ها، وزیکول ها و کپسول های مولکولی غیر کووالانسی نمونه هایی از نانوراکتورهای خودآرا هستند. باید به این نکته توجه کرد که کپسول سازی در داخل کپسول های غیر کووالانسی مونتاژ پذیر برگشت پذیر است، بنابراین بسته به موجودیت کپسول، تبادل مهمان در داخل و خارج آن می تواند از دو طریق انتشار مهمان، و تفکیک (جزئی) کپسول انجام شود [۶۱-۶۳]. کپسول سازی درون کپسول های مولکولی فرایندی فراتر از به دام انداختن فیزیکی است. بنابراین تعامل هایی مانند برهمکنش های آبگریز و π - π نقش مهمی در محصور سازی انتخابی مولکول های مهمان دارند. نانوراکتورهای خودآرا همچنین می توانند توسط برهمکنش های فلز-لیگاند ایجاد شوند. در نتیجه می توان کمپلکس های کوئوردیناسی فوق مولکولی که از محصولات ترمودینامیکی هستند، را از تشکیل پیوند لیگاند خود به خودی در مخلوطی از پیش ماده های فلز محلول و لیگاند بدست آورد. این کپسول های خودآرا، که به خودآرا هماهنگ کننده معروف هستند، از کپسول های بر پایه پیوند هیدروژنی مقاوم ترند. در ابتدا، تلاش ها بر روی کپسوله سازی بستر کوچک بود، اما اخیراً گزارش شده است که کپسوله شدن بستر بزرگتر مانند آدامانتین و فولرنس با استفاده از نانوراکتورهای خودآرا انجام شده است [۶۴-۶۵].

۴- کاربردها

کاربرد نانوراکتورها برای برنامه های مختلف از جمله سنتز آلی انتخابی، پیشرفت های زیست پزشکی و ابزار تحلیلی برای مطالعه مکانیسم های واکنش های جدید نتایج چشم گیری داشته است. بنابراین در ادامه به طور خلاصه به برخی از کاربردهای نانوراکتورها می پردازیم.

۴-۱- کاتالیز

یکی از مهم ترین و کارآمدترین کاربردهای نانوراکتورها، کاتالیز است. نانوراکتورها برای رفع مشکلات عمده در زمینه کاتالیزگر از جمله بازیابی کاتالیزگر، انتخابی عمل کردن و کارایی مجدد پتانسیل بالقوه دارند. برای نزدیک شدن به کاتالیزگرهایی که از فعالیت زیاد، گزینش پذیری، پایداری بالا و جداسازی آسان بهره مند هستند، نانوراکتورها یک گزینه بسیار جذاب است. انواع مختلف از نانوراکتورها از جمله دندریمر، قفس های هماهنگ خود آرا، سیکلودکسترین ها، کوکوریبتوریل ها، کالیکس ارن ها، رزورسینارن ها و ... برای کاتالیز کردن طیف وسیعی از واکنش های شیمیایی استفاده شده است. کپسوله سازی انتخابی و سازماندهی مجدد بسترها در فضای محدود نانوراکتور و افزایش غلظت موضعی درون نانوراکتور می تواند منجر به واکنش پذیری، افزایش سرعت واکنش، عملکرد خوب و تغییر در مسیر واکنش شود [۶۶-۶۹].

۴-۲- محافظت، الگوبرداری و تثبیت مواد نانو

کپسول سازی مولکول مهمان در نانوراکتور می تواند منجر به محافظت از مهمان در برابر محلول شود. این امر می تواند برای تثبیت، انزوا و شناسایی واسطه های ناپایدار و بسیار واکنش پذیر، مانند رادیکال ها، کاربن ها، نیترن ها و محصولات حساس راهی باز کند. اخیراً در پژوهشی تثبیت کننده فاز داخلی سیکلوبوتادین، اورتو-بنزین و سیکلوپنتاترین و خواص آنها را در محلول با استفاده از نانوراکتورهای مولکولی بررسی کرده اند. در این زمینه، ریموند و همکارانش کپسوله سازی و تثبیت کاتیون های مختلف ایمینیم، کاتیونهای دیازونیوم معطر و کاتیونهای تروپلیوم را در نانوراکتورهای خودآرا گزارش دادند [۷۰]. علاوه بر این، از این نوع نانوراکتور برای کپسوله سازی و تثبیت مولکولهای P4 چهار ضلعی واکنش پذیر و کمپلکس فلزات واسطه اشباع نشده استفاده شده است. کپسول سازی مولکولی در نانوراکتورها، همچنین برای

دارای کاربردهای گسترده‌ای به ویژه در کاتالیز واکنش‌های شیمیایی هستند. شایان ذکر است که استفاده از نانوراکتورها برای تخریب و تثبیت نانومواد محدود به اکسیدهای فلز یا نانو ذرات فلزی نیست. به عنوان مثال، نانوراکتورهای دندریتیک برای سنتز و ارتقا خواص نقاط کوانتومی استفاده شده‌اند [۷۳-۷۷].

۴-۳- علم پلیمر

یکی دیگر از کاربردهای نانوراکتورها در علوم پلیمر است. از پلیمریزاسیون در حفره داخلی نانوراکتور می‌توان برای کنترل میزان پلیمریزاسیون و وزن مولکولی پلیمر حاصل استفاده کرد. علاوه بر این، با استفاده از نانوراکتور می‌توان به پلیمرهای خود ترمیم شونده دست یافت. به عنوان مثال، پلیمریزاسیون آنیلین در محیط محدود به رس‌های پلی الکترولیت کروی انجام شد. کپسوله سازی مونومرهای آنیلین در داخل یک نانوراکتور و انتقال کنترل شده اکسید کننده به واکنش، شرایط بهینه را برای پلیمریزاسیون ماتریس فراهم می‌کند. پایداری جنبشی عالی ذرات هسته-پوسته حاصل و همچنین هدایت ماکروسکوپی بالای کامپوزیت مربوطه، چشم اندازه‌های جدیدی را برای مواد جدید باز می‌کند. یک ساختار کروی خود آرا با تحمل ۲۴ واحد متیل متاکریلات در داخل خود توسط فوجیتا و همکاران تهیه شده است. نشان داده شد که پلیمریزاسیون رادیکال اندوهدرال می‌تواند به دلیل افزایش غلظت واحدهای مونومر در هسته مجموعه افزایش یابد. همچنین، وایت و همکارانش با استفاده از نانوراکتور، پلیمرهای خود ترمیم شده ای را تولید کردند، که این روش مبتنی بر ترکیب میکروکپسول های پر شده با عوامل ترمیمی، مونومرهای دی سیکلوپنتادین و استفاده از کاتالیزگر مناسب در ماتریس اپوکسی بود. تشکیل ترک‌ها باعث پاره شدن میکروکپسول‌ها و ترمیم آنها شد. عوامل ترمیمی از طریق نیروهای مویرگی که در اثر تماس با کاتالیزگر پلیمری شده‌اند، منجر به اتصال دو قسمت ترک بهم می‌شوند [۶۴].

۴-۴- توسعه نانوداروها

نانو راکتورها منجر به پیشرفت چشمگیری در زمینه نانو پزشکی شده‌اند. گزارش‌ها و مقالات مروری متعددی در مورد کاربردهای نانوراکتورهای مختلف مانند نانوراکتورهای دندریتیک، پلیمرزوم، و نانو بردارها برای درمان، تشخیص و تحویل دارو و ژن به عنوان

محافظت از رنگهای آلی در برابر اثرات تخریب فتوشیمیایی استفاده شده است. نانوراکتورها همچنین می‌توانند در واکنش‌های فتوشیمیایی و توسعه فوتوکاتالیست‌ها استفاده شوند. به عنوان مثال نانوذرات محافظت شده با دندریمر، سنتز و فعالیت فوتوکاتالیستی آنها برای تخریب نوری ۲،۴ اسید دی کلروفنوکسی استیک با نانوذرات تیتانیوم دی اکسید مقایسه شد. نتایج نشان داد که دندریتیک دارای فعالیت فوتوکاتالیستی بهتری نسبت به نانوذرات تیتانیوم دی اکسید است که به تثبیت نانوذرات و تقویت فعالیت فوتوکاتالیستی نسبت داده شد [۶۶-۶۹]. کپسوله سازی نه تنها منجر به محافظت فیزیکی می‌شود، بلکه همچنین بر طول موج جذب یا عملکرد کوانتومی فلورسانس تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، مطالعه کپسوله سازی رنگ فلورسنت در نانوراکتورهای دندریتیک فلورسنت نشان داد که کپسوله سازی می‌تواند منجر به فرایندهای خنک سازی/حساسیت زایی شود که می‌تواند برای اهداف مختلفی از جمله توسعه و ساخت حسگرهای شیمیایی مورد بهره برداری قرار گیرد. نانو راکتورها همچنین می‌توانند برای محافظت از یک محل واکنش یا مسدود کردن واکنش از طریق کپسوله شدن یک واکنش دهنده استفاده شوند. به عنوان مثال، می‌توان از طریق کپسوله سازی و محافظت از محل واکنش داخلی بستر درون حفره کپسول، قدرت انتخاب جانشینی هسته دوستی کلریدهای آللیک/آریل را کنترل کرد [۷۱-۷۲].

میکرو راکتورهای نانو برای سنتز نانو مواد با شکل و اندازه مشخص مانند نانوذرات و نانولوله‌ها قابل بهره برداری هستند. به دام انداختن نانوذرات درون حفره نانوراکتور می‌تواند برای تثبیت نانوذرات و جلوگیری از تجمع آن‌ها استفاده شود. علاوه بر این، کپسوله سازی نانوذرات از طریق اصلاح جهت و پیکربندی می‌تواند بر خصوصیات آنها تأثیر بگذارد. نانوراکتورهای مختلفی مانند دندریمرها و قفس‌های پروتئینی برای این منظور استفاده شده است. به عنوان مثال، سنتز نانو ذرات سیلیس با قطر ۲-۴ نانومتر و نانو ذرات پوسته-هسته‌ای با نانو ذرات هسته سیلیس مونو دیسپرس و یک لایه اکسید فلز (ZrO_2 یا TiO_2) به قطر ۳ نانومتر با استفاده از نانوراکتورهای خودآرا سنتز شده است. همچنین گزارش‌های زیادی در مورد نوسان و تثبیت انواع نانو ذرات کپسوله شده دندریمر تک و دو فلزی مانند Au ، Ag ، Co ، Ni ، Pd ، Cu ، $Ag-Pd$ ، Au و $Pd-Au$ ، Ag و غیره وجود دارد. نانو ذرات محصور شده در دندریمر

نانوحامل وجود دارد. مهمترین عواملی که باعث شده اند تا نانوراکتورها در این زمینه مورد توجه باشند عبارتند از [۷۸-۷۹]:

- قابلیت بارگیری بالا
- سازگاری زیستی و تجزیه بیولوژیکی
- انتشار کنترل شده
- پایداری و مقاومت بالا

۴-۵- حسگرها

نانو راکتورها می توانند به عنوان بستری برای توسعه سیستم های حساس و تحریک پذیر استفاده شوند. به عنوان مثال، یک نانوراکتور مبتنی بر قفس کلسیم فسفات طراحی شده است و به گونه های واکنش پذیر اکسیژن پاسخ می دهد و در نتیجه در منطقه نزدیک به مادون قرمز، فلورسانس نشر می کند. نانوراکتورهای پاسخ دهنده به محرک ها مانند وزیکول های پلیمری، که به وزیکول های پلیمری هوشمند نیز اشاره دارد، به محرک هایی مانند تغییرات pH، دما و نور پاسخ می دهند و می توانند به عنوان حامل های مفیدی برای کپسول سازی و دارورسانی کنترل شده و یا انتقال سایر ترکیبات بیولوژیکی در نظر گرفته شوند [۸۰].

۵- اثرات کپسوله سازی

کپسوله سازی مولکول های مهمان در محیط آبریز نانوراکتورها منجر به جداسازی مهمان از بالک محلول می شود. این محیط میکرو می تواند کنفورماسیون خاصی از مهمان را القا کند. تشخیص مولکولی و کپسوله سازی انتخابی مهمان یکی از ویژگی های کلیدی نانوراکتورها است و انتظار می رود مهمان راحت تر از سایر مولکول ها کپسوله شوند. به این طریق عوامل مهم تاثیر گذار بر کپسوله سازی در نانوراکتورها به سه مورد زیر ختم می شوند:

- شکل مولکول مهمان
- اندازه مولکول مهمان
- سطح شیمیایی مولکول مهمان

ویژگی های دیوار داخلی نانوراکتورها و برهمکنش های بین مهمان و دیوارهای محصور شده می تواند بر پتانسیل کاهش اکسیداسیون مهمان و انرژی آزاد گیبس تأثیر بگذارد و واکنش پذیری مهمان را

تغییر دهد. علاوه بر این بر ترازبندی مولکولی، پویایی چرخشی و تکامل حالت انتقال واکنش تأثیر بگذارد.

واکنش دو مولکولی در محیط محدود یک نانوراکتور بر این تعاملات تأثیر می گذارد. اگر دو مولکول نتوانند به اندازه کافی خود را برای رسیدن به حالت گذار یا آرام شدن کامل پس از تشکیل کپسول تراز کنند، بازده محصولات می تواند تغییر کند. علاوه بر این، کپسوله سازی می تواند منجر به تثبیت یک حالت گذار خاص شود و از یک مسیر واکنش که در محلول بالک مورد پسند نیست، پیشروی کند. دیواره های نانوراکتور با نسبت سطح به حجم زیاد فضای واکنش محدودی را ایجاد می کنند که می تواند با کاهش میانگین مسیر آزاد منجر به افزایش غلظت واکنش دهنده ها و سرعت واکنش شود. برخورد مکرر با مولکول ها را می توان در محیط محدود یک نانوراکتور به دلیل دافعه دیواره ها و مولکول ها انتظار داشت. بنابراین، مسیرهای واکنشی که از نظر انرژی در محلول نامطلوب هستند، ممکن است با انجام واکنش در داخل یک نانوراکتور قابل دسترسی باشند. میزان واکنش واکنش دهنده های درون نانوراکتور نیز می تواند تحت تأثیر جذب واکنش دهنده های سطح باشد که در واقع می تواند انتشار را کند کند. همچنین، محیط نانوراکتور ممکن است باعث جداسازی فاز حلال ها و واکنش دهنده ها شود. به عنوان مثال، جابجایی یک حلال معین با واکنش دهنده های جذب شده می تواند منجر به تغییر مکانیسم واکنش یا سینتیک متفاوت شود [۸۱-۸۶]. در میان اثرات کپسول سازی مورد بحث عوامل غالب و تعیین کننده اثرات کپسول سازی عبارتند از:

- بعد فضای نانوراکتور
- تعداد مولکول های داخل
- برهمکنش بین دیوار و واکنش دهنده ها
- وجود ویژگی های کاتالیزوری

طیفسنجی رزونانس مغناطیس هسته یک روش مفید برای توصیف مکان مولکولی در نانوراکتورها و بررسی تأثیر شکل و اندازه کپسول های مولکولی است. با استفاده از روش های طیف سنجی برای تشخیص محل مولکولی در داخل یک نانوراکتور، باید در نظر داشت که کپسوله شدن درون نانوراکتور و وجود مولکول های دیگر در نانوراکتور می تواند خصوصیات طیفی مولکول های مهمان را تغییر دهد. همچنین کریستالوگرافی اشعه ایکس روشن ترین شواهد

- تشکیل همزمان مشتقات با میل کمتر از محصول به نانوراکتور
- طراحی نانوراکتورهایی با میل شدید به واکنشگر هدف و میل کم به محصول

۶- نتیجه گیری

نانوراکتورها نوعی راکتور شیمیایی هستند که در حیطه نانو فناوری و نانوزیست فناوری قرار می گیرند. نانوراکتورها با استراتژی های به کار گرفته شده توسط سلول های زنده طراحی می شوند. هدف اصلی نانوراکتورها محدود کردن یک محیط واکنش با میزبانی یا کپسوله کردن مواد مهمان است. در واقع نانوراکتورها محفظه های بسیار کوچکی با اندازه نانومتر هستند. در حقیقت یک نانوراکتور از مهمان داخل ساختار نانوراکتور در برابر تاثیرات محیطی محافظت کرده، و واکنشگرها و کاتالیزگرها را در فضایی کوچک نگه می دارد. نکته حائز اهمیت این است که علاوه بر انجام گستره وسیعی از واکنش های شیمیایی، فضای درون نانوراکتورها محیط مناسبی برای تولید نانو ساختارهای مختلف می باشد. در سال های اخیر، ویژگی های قابل توجه نانوراکتورها بعد جدیدی را در زمینه های علوم پلیمر، مواد، شیمی، مهندسی زیست پزشکی و مهندسی شیمی ارائه می دهد.

مراجع

1. D.M. Vriezema, M. Comellas Aragonès, J.A. Elemans, J.J. Cornelissen, A.E. Rowan, R.J. Nolte, *Chem. Rev* 105, 1445-1490 (2005)
2. B. Vafakish, L.D. Wilson, *Polysaccharides* 2, 168-186 (2021)
3. K. Renggli, P. Baumann, K. Langowska, O. Onaca, N. Bruns, W. Meier, *Adv. Funct. Mater* 21, 1241-1259 (2011)
4. S.H. Petrosko, R. Johnson, H. White, C.A. Mirkin, *J. Am. Chem. Soc* 138, 7443-7445 (2016)
5. C. Deraedt, D. Astruc, *Coord. Chem. Rev* 324, 106-122 (2016)

ساختاری از زمان فروپاشی را فراهم می کند. برای برهمکنش های بین مولکولی نیاز به ترکیبی از روش های حالت محلول (طیف سنجی رزونانس مغناطیسی هسته، طیف سنجی جرمی) و روش های حالت جامد (تجزیه و تحلیل ساختار اشعه X) است تا درک کلی رفتار میزبان-مهمان بررسی شود. در مورد نانوراکتورهای خود آرا، به دلیل ماهیت پویا و انعطاف پذیر نانوراکتورهای خود آرا مکانیسم های ورود مهمان، تبادل مهمان و تعاملات میزبان-مهمان ساده نیستند [۸۷-۸۸]. مساله مهم دیگر بحث رهاسازی محصول از نانوراکتور است. در واقع رهاسازی محصول از نانوراکتور یک پارامتر اساسی برای سیستم های کاتالیزگری مبتنی بر نانوراکتور است. این امر می تواند بر گردش کاتالیزگری و یا میزان واکنش درون نانوراکتور تأثیر بگذارد و از کاربرد آن به عنوان یک کاتالیزگر واقعی جلوگیری کند. دو عامل اساسی موثر بر مهار محصول و جلوگیری از رهاسازی آن از نانوراکتور در یک واکنش کاتالیزگری مبتنی بر نانوراکتور عبارتند از [۸۹-۹۰]:

- اثرات آنتالپی

- اثرات آنتروپی

یک استراتژی برای حل این مشکل درگیر کردن محصول در یک واکنش با استفاده از روشی است که منجر به تولید ترکیبی با میل کمتر به نانوراکتور می شود. رویکردهای دیگر مبتنی بر طراحی نانوراکتورها به گونه ای است که آنها اتصال بیشتری به واکنش دهنده ها نسبت به محصولات دارند و یا محصولات واکنش را با اندازه یا شکل متناسب با حفره هدف قرار می دهند. بزرگ بودن محصول در برخی از نانوراکتورها ممکن است از انتشار آن جلوگیری کرده و منجر به مهار محصول شود. در این حالت، طراحی نانوراکتورهای محدودتر با پورتال های بزرگتر و / یا هدف گذاری محصولات کوچکتر، می تواند راه حلی برای این مسئله باشد. به طور خلاصه برای حل مشکلات ناشی از اثرات آنتالپی و آنتروپی در رهاسازی محصول از نانوراکتورها می توان رویکردهای زیر را دنبال کرد [۸۹-۹۰]:

- هدف قرار دادن محصولات با میل کمتر به نانوراکتور
- سنتز نانوراکتورهایی با پورتال های بزرگتر
- هدف قرار دادن محصولات کوچکتر از اندازه حفره نانوراکتور

19. J. Liu, S.Z. Qiao, J.S. Chen, X.W.D. Lou, X. Xing, G.Q.M. Lu, ChemComm 47, 12578-12591 (2011)
20. V. Balasubramanian, O. Onaca, R. Enea, D.W. Hughes, C.G. Palivan, Expert Opin Drug Deliv 7, 63-78 (2010)
21. A. Ranquin, W. Versées, W. Meier, J. Steyaert, P. Van Gelder, Nano Lett 5, 2220-2224 (2005)
22. S. Mei, X. Xu, R.D. Priestley, Y. Lu, Chem. Sci 11, 12269-12281 (2020)
23. A. Botos, J. Biskupek, T.W. Chamberlain, G.A. Rance, C.T. Stoppiello, J. Sloan, A.N. Khlobystov, J. Am. Chem. Soc 138, 8175-8183. (2016)
24. M.C.M. Van Oers, F.P.J.T. Rutjes, J.C.M. Van Hest, urr. Opin. Biotechnol 28, 10-16 (2014)
25. U. Díaz, A. Corma, Eur. J. Chem.24, 3944-3958 (2018)
26. M. Kuepfert, A.E. Cohen, O. Cullen, M. Weck, Eur. J. Chem 24, 18648-18652 (2018)
27. J. Li, J. Huang, Y. Jiang, L. Wu, Y. Deng, Adv. Funct. Mater 33, 2212317 (2023)
28. M. Kaur, B. Singh, Chem. Sci. J 9, 1000192 (2018)
29. S. Lu, W.W. Li, D. Rotem, E. Mikhailova, H. Bayley, Nat. Chem 2, 921-928 (2010)
30. H. Ren, C.G. Cheyne, A.M. Fleming, C.J. Burrows, H.S. White, J. Am. Chem. Soc 140, 5153-5160 (2018)
31. W.J. Ramsay, N.A. Bell, Y. Qing, H. Bayley, J. Am. Chem. Soc 140, 17538-17546 (2018)
6. M. Comellas-Aragonès, H. Engelkamp, V.I. Claessen, N.A. Sommerdijk, A.E. Rowan, P.C. Christianen, R.J. Nolte, Nat. Nanotechnol 2, 635-639 (2007)
7. J.W. Wilkerson, S.O. Yang, P.J. Funk, S.K. Stanley, B.C. Bundy, N Biotechnol 44, 59-63 (2018)
8. A. Liu, C.H.H. Traulsen, J.J. Cornelissen, ACS Catal 6, 3084-3091 (2016)
9. D. Inger, M.P. Pileni, Adv. Funct. Mater 11, 136-139 (2001)
10. Y. Liu, J. Wang, M. Zhang, H. Li, Z. Lin, ACS nano 14, 12491-12521 (2020)
11. D. Zhang, C. Chen, X. Wang, G. Guo, Y. Sun, Part Part Syst Charact 35, 1700413 (2018)
12. S.M. Kim, M. Jeon, K.W. Kim, J. Park, L.S. Lee, J. Am. Chem. Soc 135, 15714-15717 (2013)
13. J.H. Swisher, L. Jibril, S.H. Petrosko, C.A. Mirkin, Nat. Rev. Mater 7, 428-448 (2022)
14. M.T. De Martino, L.K. Abdelmohsen, F.P. Rutjes, J.C. van Hest, Beilstein J. Org. Chem 14, 716-733 (2018)
15. R. Syah, M. Zahar, E. Kianfar, Int. J. Chem. React. Eng 19, 981-1007 (2021)
16. Z. Yu, N. Ji, X. Li, R. Zhang, Y. Qiao, J. Xiong, X. Lu, Angew. Chem., Int. Ed 62, e202213612 (2023)
17. Q. Yang, D. Han, H. Yang, C. Li, Chem. Asian J 3, 1214-1229 (2008)
18. N. Chen, S. Li, X. Li, Q. Zhan, L. Li, L. Long, X. Yuan, J. Chem. Eng 429, 132305 (2022)

44. B. Thingholm, P. Schattling, Y. Zhang, B. Städler, *Small* 12, 1806-1814 (2016)
45. M. Godoy-Gallardo, M.J. York-Duran, L. Hosta-Rigau, *Adv. Healthc. Mater* 7, 1700917 (2018)
46. J.S. Plegaria, C.A. Kerfeld, *Curr. Opin. Biotechnol* 51, 1-7 (2018)
47. C.R. Gonzalez-Esquer, S.E. Newnham, C.A. Kerfeld, *Plant J* 87, 66-75 (2016)
48. A. de la Escosura, R.J. Nolte, J.J. Cornelissen, *J. Mater. Chem* 19, 2274-2278 (2009)
49. K.T. Kim, S.A. Meeuwissen, R.J. Nolte, J.C. van Hest, *Nanoscale* 2, 844-858 (2010)
50. B. Maity, K. Fujita, T. Ueno, *Curr Opin Chem Biol* 25, 88-97 (2015)
51. L. Zakharova, Y. Kudryashova, A. Ibragimova, E. Vasilieva, F. Valeeva, E. Popova, A. Konovalov, *J. Chem. Eng* 185, 285-293 (2012)
52. W.C. e Vries, B.J. Ravoo, *Supramolecular Chemistry in Water* 375-411 (2019)
53. Y.D. Tretyakov, A.V. Lukashin, A.A. Eliseev, *Russ. Chem. Rev* 73, 899-921 (2004)
54. G. Chen, X.A. Fang, Q. Chen, J.G. Zhang, Z. Zhong, J. Xu, G. Ouyang, *Adv. Funct. Mater* 27, 1702126 (38)
55. S. Ordanini, F. Cellesi, *Pharmaceutics* 10, 209 (2018)
56. T. Nishimura, S. Hirose, Y. Sasaki, K. Akiyoshi, *J. Am. Chem. Soc* 142, 154-161 (2019)
57. L. Jing, X. Zhang, R. Guan, H. Yang, *Catal. Sci. Technol* 8, 2304-2311 (2018)
32. Y.Q. Tan, B. Xue, W.S. Yew, *Molecules* 26, 1389 (2021)
33. H. Kirst, B.H. Ferlez, S.N. Lindner, C.A. Cotton, A. Bar-Even, C.A. Kerfeld, *Proc. Natl. Acad. Sci* 119, e2116871119 (2022)
34. V. Balasubramanian, A. Poillucci, A. Correia, H. Zhang, C. Celia, H.A. Santos, *ACS Biomater. Sci. Eng* 4, 1471-1478 (2018)
35. T.G. Edwardson, M.D. Levasseur, S. Tetter, A. Steinauer, M. Hori, D. Hilvert, *Chem. Rev* 122, 9145-9197 (2022)
36. N.P. Kamat, J.S. Katz, D.A. Hammer, *J. Phys. Chem* 2, 1612-1623 (2011)
37. C.G. Palivan, O. Fischer-Onaca, M. Delcea, F. Iteț, W. Meier, *Chem. Soc. Rev* 41, 2800-2823 (2012)
38. Y.M. Mohan, K. Lee, T. Premkumar, K.E. Geckeler, *Polymer* 48, 158-164 (2007)
39. A. Larrañaga, M. Lomora, J.R. Sarasua, C.G. Palivan, A. Pandit, *Prog. Mater. Sci* 90, 325-357 (2017)
40. F. Rodrigues, T. Georgelin, G. Gabant, B. Rigaud, F. Gaslain, G. Zhuang, M. Jaber, *J. Phys. Chem* 10, 4192-4196 (2019)
41. M. Stöter, B. Biersack, N. Reimer, M. Herling, N. Stock, R. Schobert, J. Breu, *Chem. Mater* 26, 5412-5419 (2014)
42. J. Bain, S.S. Staniland, *Phys. Chem. Chem. Phys* 17, 15508-15521 (2015)
43. S.F. Van Dongen, W.P. Verdurmen, R.J. Peters, R.J. Nolte, R. Brock, J.C. Van Hest, *Angew. Chem* 122, 7371-7374 (2010)

72. S. Singh, C. Rao, C.K. Nandi, T.K. Mukherjee, *ACS Appl. Nano Mater* 5, 7427-7439 (2022)
73. Y.M. Chung, H.K. Rhee, *CATAL LETT* 85, 159-164 (2003)
74. B.D. Chandler, J.D. Gilbertson, *Dendrimer catalysis* 97-120 (2006)
75. J.S. Croley, K.J. Stevenson, *UT-Austin* 1-21 (2008)
76. R. Ricciardi, J. Huskens, W. Verboom, *J. Flow Chem* 5, 228-233 (2015)
77. B. Devadas, A.P. Periasamy, K. Bouzek, *Coord. Chem. Rev* 444, 214062 (2021)
78. A. Ostafin, K. Landfester, K. Artech House (2008)
79. A. Najer, D. Wu, D. Vasquez, C.G. Palivan, W. Meier, *Nanomed* 8, 425-447 (2013)
80. Y.C. Chen, *The University of Utah* (2011)
81. I. Louzao, J.C. van Hest, *Biomacromolecules* 14, 2364-237 (2013)
82. S.A. Dergunov, A.T. Khabiyev, S.N. Shmakov, M.D. Kim, N. Ehterami, M.C. Weiss, E. Pinkhassik, *ACS nano* 10, 11397-11406 (2016)
83. D.P. Patterson, B. Schwarz, K. El-Boubbou, J. van der Oost, P.E. Prevelige, T. Douglas, *Soft Matter* 8, 10158-10166 (2012)
84. P. Kraj, E. Selivanovitch, B. Lee, T. Douglas, *Biomacromolecules* 22, 2107-2118 (2021)
85. P. Tanner, P. Baumann, R. Enea, O. Onaca, C. Palivan, W. Meier, *Acc. Chem. Res* 44, 1039-1049 (2011)
58. G. Song, Y. Chen, C. Liang, X. Yi, J. Liu, X. Sun, Z. Liu, *Adv Mater* 28, 7143-7148 (2016)
59. J. Gaitzsch, D. Appelhans, L. Wang, G. Battaglia, B. Voit, *Angew. Chem., Int. Ed* 51, 4448-4451 (2012)
60. M. Fang, P.S. Grant, M.J. McShane, G.B. Sukhorukov, V.O. Golub, Y.M. Lvov, *Langmuir* 18, 6338-6344 (2002)
61. S.B. Timmermans, J.C. van Hest, *Curr Opin Colloid Interface* 35, 26-35 (2018)
62. T.S. Koblenz, J. Wassenaar, J.N. Reek, *Chem. Soc. Rev* 37, 247-262 (2008)
63. P. Khullar, V. Singh, A. Mahal, H. Kumar, G. Kaur, M.S. Bakshi, *J. Phys. Chem. B* 117, 3028-3039 (2013)
64. S. Sadjadi, *Academic Press* 257-303 (2016)
65. D. Bonifazi, S. Mohnani, A. Llanes-Pallas, *Eur. J. Chem* 15, 7004-7025 (2009)
66. K. Chaudhary, K. Prakash, D.T. Masram, *Appl. Surf. Sci* 509, 144902 (2020)
67. J. Li, H.C. Zeng, *Angew. Chem., Int. Ed.* 44, 4342-4345 (2005)
68. X. Huang, C. Guo, J. Zuo, N. Zheng, G.D. Stucky, *Small* 5, 361-365 (2009)
69. X. Lu, X. Bian, G. Nie, C. Zhang, C. Wang, Y. Wei, *J. Mater. Chem.* 22, 12723-12730 (2012)
70. H. Miyamura, R.G. Bergman, K.N. Raymond, F.D. Toste, *J. Am. Chem. Soc* 142, 19327-19338 (2020)
71. J. Wei, K. Li, H. Yu, H. Yin, M.A. Cohen Stuart, J. Wang, S. Zhou, *ACS omega* 5, 6852-6861 (2020)

86. C. Wu, Z. Xing, B. Fang, Y. Cui, Z. Li, W. Zhou, J. Mater. Chem 10, 180-191 (2022)
87. V.P. Nanikov, Chem. Rev 111, 418-454 (2011)
88. L. León-Boigues, L.A. érez, C. Mijangos, Polymers 13, 602 (2021)
89. K. Damarla, Y. Rachuri, E. Suresh, A. Kumar, Langmuir 34, 10081-10091 (2018)
90. M.A. Martínez, D. Aranda, E. Ortí, J. Aragón, L. Sánchez, Org. Chem. Front 10, 1959-1967 (2023)

A brief overview of nanoreactors: types and applications

A. Deghani, M. Ghezsofloo, L. Moradi*

Department of Organic Chemistry, Faculty of Chemistry, Kashan University, Kashan, Iran

Abstract: A very challenging concern of researchers in the last century has always been the production of chemicals at the nanometer scale, and at the same time, chemists have tried to understand how basic chemical principles change when systems are confined to nanoscale spaces. A long-pursued goal in nanoscience is to capture the essence of structures and functions of complex biological systems, as epitomised by cells, by creating artificial nanostructures in a rational manner. For this purpose, different strategies have been proposed and experimentally investigated. In the meantime, nanoreactors have been proposed as an emerging phenomenon and a new practical and scientific strategy for the production of nanomaterials. Nanoreactors change the basic chemical nature of molecules and moieties within them, and alter how they behave in chemical reactions. In fact, nanoreactors are very small chambers of nanometer size that protect the catalysts or the drug that is placed as a guest inside the nanoreactor structure from environmental influences, and they enclose reactants and catalysts in a small space for a long time, and as a result, they show great potential for improving chemical processes. The important point is that in addition to performing a wide range of chemical reactions, the space inside nanoreactors is a suitable environment for the production of various nanostructures. In this article, nanoreactors and some of their applications are briefly introduced.

Keywords: Nanoreactors, Self-assembled nanoreactors, Natural and synthetic nanoreactors