

Polymerization  
Quarterly, 2025  
Volume 15, Number 3  
Pages 53-64  
ISSN: 2252-0449

# Digital Polymers: A Revolution in Information Storage Technology and Encryption by Writing on Polymer Chains

Mohammad Reza Ehsani and Hassan Fattahi\*

Department of Polymer Engineering, Composite Research Institute, Malek Ashtar  
University of Technology, P.O. Box 1774-15875, Tehran, Iran

Received: 12 May 2025, Accepted: 17 September 2025

## Abstract

The use of recycled plastics in the construction industry has been considered as a Digital polymers are a special class of copolymers with a narrow molecular weight distribution in which the monomer sequence along the polymer chain is precisely dictated using specific synthetic methods. Inspired by the nature that biological information is stored on biomolecules through specific molecular sequences, the idea has emerged that information can be encoded in binary form onto polymer chains by synthesizing copolymers with defined monomer sequences. Considering the various methods of information encoding on polymer chains such as topological encoding, sequence-controlled monomer encoding, and optical encoding, this article focuses on the investigation of sequence-controlled monomer encoding. Achieving such information-containing polymers requires first, the design of specific monomers, then the synthesis of polymers using fully controlled methods, and finally, accurate techniques for reading the stored information. Writing information into polymers is mainly carried out through iterative synthesis techniques such as solid-phase synthesis or click chemistry reactions, while reading the stored data is typically done using tandem mass spectrometry. The structural diversity of these information-containing polymers results in higher stability, increased storage density, and minimal spatial footprint. These advantages position digital polymers as a next-generation data storage technology, offering high-capacity storage in an extremely compact, molecular-scale format.

## Key Words

digital polymer,  
data storage,  
sequence-defined polymer,  
molecular encryption,  
tandem mass spectrometry

(\*) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: fattahi@mut.ac.ir

# پلیمرهای رقمی: انقلابی در فناوری ذخیره سازی اطلاعات و رمزگذاری با نوشتن روی زنجیرهای پلیمری

محمد رضا احسانی و حسن فتاحی\*

تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده مهندسی کامپوزیت، گروه مهندسی پلیمر،

صندوق پستی ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۲۵

پلیمرهای رقمی نوع خاصی از کopolymerها با توزیع باریک جرم مولکولی هستند که در آنها توالی مونومرها در زنجیرهای پلیمری به طور کاملاً کنترل شده با روش‌های خاص سنتزی دیکته می‌شود. با الهام از طبیعت که اطلاعات زیستی بر اساس توالی خاصی از مولکول‌ها روی مولکول‌های زیستی ذخیره می‌شوند، این ایده مطرح شده است که با سنتز کopolymerها با توالی خاصی از مونومرها می‌توان اطلاعات را به شکل کدهای دودویی روی زنجیرهای پلیمری ذخیره کرد. در این مطالعه، با توجه به روش‌های مختلف رمزگذاری اطلاعات روی زنجیرهای پلیمری مانند رمزگذاری‌های توپولوژیکی، با کنترل توالی مونومری و نوری، رمزگذاری با کنترل توالی مونومری بررسی شده است. دستیابی به پلیمرهای حاوی اطلاعات در قدم اول نیازمند طراحی مونومرهای خاص و در مرحله بعد، سنتز پلیمرها با روش کاملاً کنترل شده و نهایتاً روش دقیق خواندن اطلاعات ذخیره شده است. روش‌های نوشتن اطلاعات در پلیمرها عمدتاً با روش سنتز تکراری مانند سنتز در فاز جامد یا واکنش‌های کلیک انجام می‌شود و روش خواندن اطلاعات ذخیره شده نیز عمدتاً با طیف‌سنجی جرمی پیاپی انجام می‌گیرد. تنوع ساختار پلیمرهای حاوی اطلاعات، پلیمرهای رقمی را با پایداری و چگالی ذخیره‌سازی بیشتر و اشغال فضای کمتر همراه می‌سازد. این عوامل باعث می‌شود، پلیمرهای رقمی به عنوان نسل آینده فناوری ذخیره‌سازی اطلاعات با ظرفیت ذخیره‌سازی زیاد در فضایی بسیار کوچک و در مقیاس مولکولی در نظر گرفته شوند.

بسپارش  
فصلنامه علمی  
سال پانزدهم، شماره ۳  
صفحه ۶۴-۵۳، ۱۴۰۴  
ISSN: 2252-0449

## چکیده



محمد رضا احسانی



حسن فتاحی

## واژگان کلیدی

پلیمر رقمی،  
ذخیره‌سازی اطلاعات،  
پلیمر با توالی تعریف شده،  
رمزنگاری مولکولی،  
طیف‌سنجی جرمی پیاپی

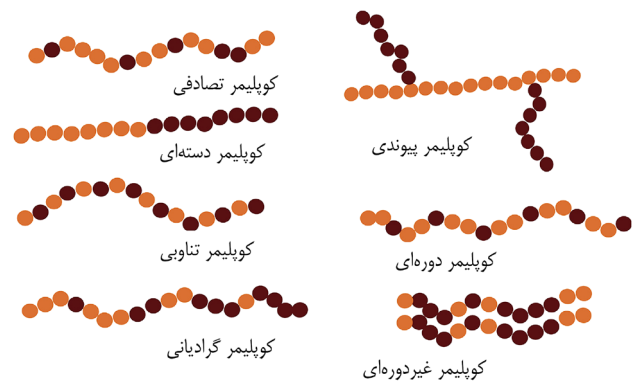
\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

fattahi@mut.ac.ir

شروع مطالعه کوپلیمرها به دهه ۱۹۳۰ بازمی‌گردد، زمانی که لاستیک سنتزی اختراع و توسعه یافت [۱]. از آن زمان تاکنون، پژوهش درباره کوپلیمرها مورد توجه زیادی قرار گرفته است. زیرا می‌توان ترکیبات بی‌نهایت متنوعی از کوپلیمرها را سنتز کرد و با تغییر گونه‌ها و ترکیب مونومرها، خواص خاص و مطلوبی را تنظیم کرد. براساس نحوه آرایش مونومرها، کوپلیمرها معمولاً به دسته‌هایی از جمله تصادفی، دسته‌ای، پیوندی، تناوبی و دوره‌ای تقسیم می‌شوند [۲]. در سال‌های اخیر، برخی انواع جدیدی از کوپلیمرها مانند کوپلیمرهای گرادینانی و کوپلیمرهای غیردوره‌ای نیز ظهور کرده‌اند [۳،۴]. شکل ۱، ساختارهای مختلف ممکن برای انواع کوپلیمرها را نشان می‌دهد. هر روز در سراسر جهان حدود  $10^{12} \times 306/4$  پست الکترونیکی ارسال می‌شود. در سال ۲۰۱۸، حجم داده‌های جهانی برابر با ۳۳ ZB ( $10^{21}$  byte) (Zettabyte) بود. پیش‌بینی می‌شود، این مقدار تا سال ۲۰۲۸ به ۳۹۴ ZB (چیزی در حدود ۱۲ برابر) برسد. براساس فناوری‌های موجود، بیشتر داده‌ها تاکنون روی نوارهای مغناطیسی، سی‌دی، دی‌وی‌دی، فلاپی دیسک‌ها، حافظه‌های ترابرد (flash memorys) و سخت‌دیسک‌ها ذخیره شده‌اند. امروزه بزرگترین سخت‌دیسک مغناطیسی دارای ظرفیت ۱۴ TB ( $10^{13} \times 1/4$  byte) است. ذخیره ۳۹۴ ZB داده نیازمند چند میلیارد عدد از این سخت‌دیسک‌هاست که به مقادیر زیادی از ویفر سیلیکونی نیاز دارد. بنابراین ذخیره‌سازی و رمزنگاری اطلاعات، بی‌شک از مهم‌ترین چالش‌های علمی و فناوری قرن بیست و یکم محسوب می‌شود [۵].

### روش‌های سنتز پلیمر (کوپلیمر)های با ساختار کنترل شده

روش‌های مرسوم پلیمر شدن به دو دسته اصلی مرحله‌ای و زنجیری

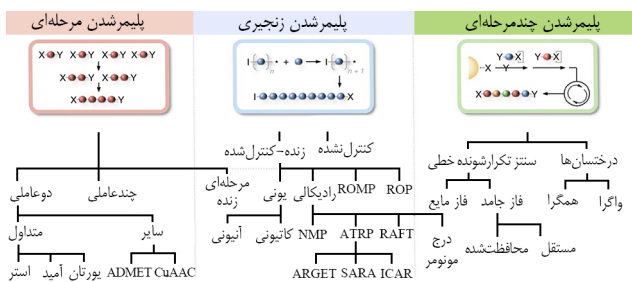


شکل ۱- ساختار انواع کوپلیمرهای مختلف [۱].

تقسیم می‌شوند. در سال‌های اخیر، روش‌های رشد چندمرحله‌ای که در آن پلیمرها با واکنش‌های گام‌به‌گام سنتز می‌شوند، به‌طور فزاینده‌ای در شیمی پلیمر، به‌ویژه برای سنتز پلیمرهای با توالی کنترل شده، برجسته شده‌اند. بنابراین در برخی دسته‌بندی‌های جدید، روش‌های پلیمر شدن به سه دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند. در شکل ۲، تقسیم‌بندی جدید روش‌های پلیمر شدن، روش‌های زیرمجموعه هر کدام و شاخص پراکندگی به‌دست‌آمده برای پلیمرهای سنتز شده با هر یک از روش‌ها خلاصه شده است [۶].

### طبقه‌بندی روش‌های رمزگذاری اطلاعات در پلیمرها

روش‌های مختلفی برای رمزگذاری اطلاعات در پلیمرها با توجه به قابلیت بسیار زیاد طراحی و کنترل ساختار آن‌ها وجود دارد. از جمله این روش‌ها رمزگذاری با کنترل توالی مونومرهاست که در آن، مونومرها با ترتیبی از پیش معین در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند [۶]. در رمزگذاری توپولوژیکی با کنترل ساختار فضایی و توپولوژیکی زنجیرهای پلیمری می‌توان اطلاعات را رمزگذاری کرد. روتاکسان‌ها و کاتنان‌ها در این دسته‌بندی قرار می‌گیرند [۷]. در این دسته از روش رمزگذاری، مانند رمزگذاری نوری، اطلاعات با استفاده از پاسخ نوری پلیمر به تابش (مانند جذب، نشر و فلوئورسانس) رمزگذاری می‌شود که برای کاربردهای زیستی و شناسایی مولکولی بسیار مفید است [۸].



شکل ۲- سنتز پلیمرهای از طریق سازوکار رشد مرحله‌ای و زنجیری یا چندمرحله‌ای: ROMP پلیمر شدن جاننشینی متقابل حلقه‌گشا، ADMET جاننشینی متقابل دی‌ان ناحلقه‌ای (acyclic diene metathesis), ARGET انتقال الکترون، ATRP پلیمر شدن رادیکالی انتقال اتم، CuAAC حلقه‌زایی آزید-آلکین کاتالیز شده با مس، ICAR آغازگرها برای بازسازی پیوسته فعال‌ساز، NMP پلیمر شدن رادیکالی با واسطه نیتروکسیدی، RAFT پلیمر شدن انتقال زنجیر افزایشی-جدایشی برگشت‌پذیر، ROP پلیمر شدن حلقه‌گشا و SARA فعال‌ساز و عامل کاهنده تکمیلی [۶].



شکل ۴- مفهوم نوشتن روی زنجیرهای پلیمری و خواندن اطلاعات ذخیره شده [۱۱].

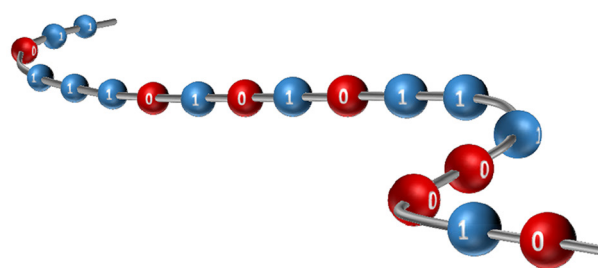
منظور مناسب نیستند. از مزایای برجسته پلیمرهای رقمی سنتزی، انعطاف پذیری بیشتر در سنتز و کنترل کامل فرایند است که امکان پایداری شیمیایی بیشتری را نسبت به DNA فراهم می‌کند. همچنین با استفاده از بیش از چهار نوع مونومر مختلف، می‌توان تعداد ترکیبات برابر را در زنجیرهای کوتاه‌تر ذخیره کرد که رویکرد اقتصادی‌تری برای ذخیره‌سازی اطلاعات ارائه می‌دهد [۶].

#### سازوکار رمزگشایی (خواندن توالی)

این سازوکار باید قابلیت بازیابی مستقیم و دقیق توالی‌های ذخیره‌شده در پلیمرهای رقمی را داشته باشد. پلیمرهای رقمی سنتزی به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که خواندن مستقیم و سریع‌تر توالی‌ها بدون نیاز به آماده‌سازی‌های پیچیده امکان‌پذیر باشد. این پیشرفت، ذخیره‌سازی و بازیابی اطلاعات را کارآمدتر و اقتصادی‌تر می‌کند و پلیمرهای رقمی سنتزی را به گزینه مناسب‌تری برای کاربردهای عملی تبدیل می‌کند [۶].

#### سنتز پلیمرهای رقمی (نوشتن اطلاعات روی زنجیرهای پلیمری)

پلیمرهای رقمی، درشت‌مولکول‌هایی هستند که اطلاعات دودویی را به‌صورت توالی کنترل‌شده از مونومرها ذخیره می‌کنند. اطلاعات رقمی می‌توانند در انواع مختلف از پلیمرهای سنتزی ذخیره شوند که شامل پلی‌تری‌آزول آمیدها، پلی‌آلکوکسی‌آمید آمیدها، پلی‌فسفودی‌استرها، پلی‌یورتان‌ها، پلی‌آلکوکسی‌آمین فسفودی‌استرها، پلیمرهای حاصل از واکنش‌های چندجزئی، پلی‌یورتان آمید، پلی‌سوکسین‌ایمید تیواتر خطی و درختی، پلی‌یورتان با نیتروژن استخلاف‌گذاری شده و پلی‌استرهاست [۲۰-۱۲]. با این حال، تمام پلیمرهای رقمی از طریق سنتز شیمیایی گام‌به‌گام تهیه می‌شوند که این موضوع طول زنجیر را به‌طور درخور توجهی محدود می‌سازد. در نتیجه، معمولاً تنها مقدار کمی از اطلاعات دودویی (مانند یک کلمه) را می‌توان در یک مولکول منفرد ذخیره کرد. برای ذخیره‌سازی حجم بیشتری از داده‌ها (مانند جمله، متن، تصویر یا ویدئو) نیاز به سازمان‌دهی فضایی کتابخانه‌ای از اولیگومرها یا پلیمرها وجود دارد. برای افزایش



شکل ۳- طرحواره نشانگر ساختار پلیمر رقمی (پلیمر حاوی اطلاعات). کره‌های آبی و قرمز نمایانگر واحدهای دو مونومر متفاوت هستند [۱۰].

#### مفهوم پلیمر رقمی یا پلیمرهای حاوی اطلاعات

پلیمر رقمی نوع خاصی از کوپلیمر بوده که توزیع جرم مولکولی آن تقریباً برابر یک است و توالی مونومرها در زنجیرهای پلیمری به‌طور کاملاً کنترل‌شده دیکته می‌شوند. ذخیره‌سازی اطلاعات روی مولکول‌های زیستی مانند DNA به مدت چند دهه بوده که در موجودات زنده شناخته شده است. ذخیره‌سازی اطلاعات در عظیم ژنتیکی روی درشت‌مولکول‌های DNA براساس توالی دقیق چهار نوکلئوتید با نام‌های آدنین (A)، تیمین (T)، سیتوزین (C) و گوانین (G) انجام می‌گیرد [۹]. در سال ۲۰۱۴ با الهام از این پدیده زیستی، این ایده مطرح شد که می‌توان با کنترل توالی مونومرها در یک کوپلیمر، اطلاعات را روی زنجیرهای پلیمری ذخیره کرد. با نام‌گذاری دو مونومر با اعداد ۰ و ۱، ترتیب مونومرها در ساختار کوپلیمر رشته‌کد دودویی به‌خود می‌گیرد که روش مرسوم ذخیره‌سازی اطلاعات است و بنابراین اصطلاح رقمی به این پلیمرها اطلاق می‌شود (شکل ۳) [۱۰].

می‌توان گفت، برای ذخیره‌سازی اطلاعات روی زنجیرهای پلیمری و بازخوانی آن‌ها، دو قابلیت و دانش اساسی مورد نیاز است. مرحله اول، نوشتن یا سنتز پلیمر با توالی دقیق کنترل‌شده و مرحله دوم، خواندن یا تعیین توالی دقیق پلیمر سنتز شده است. طرحواره این مراحل در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۱]. در ادامه به دو پیش‌نیاز اصلی برای ذخیره داده در پلیمرهای سنتزی پرداخته می‌شود.

#### سازوکار کدگذاری (نوشتن)

این سازوکار باید سنتز کنترل‌شده زنجیرهای پلیمر حاوی دو یا چند مونومر با توالی مشخص را بدون نقص و به‌طور یکنواخت ممکن سازد. روش‌های متداول پلیمر شدن مانند پلیمر شدن مرحله‌ای یا زنجیری، به دلیل ایجاد درشت‌مولکول‌های چندتوزیعی، بدین

ظرفیت ذخیره‌سازی در یک مولکول منفرد، سه پارامتر مختلف را می‌توان تنظیم کرد:

الف- طول زنجیر؛

ب- چگالی ذخیره‌سازی (یعنی حجم یک مونومر رمز‌گذاری شده و تعداد بیت‌های رمز‌گذاری شده در هر مونومر)؛

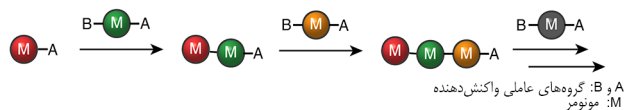
پ- فشردگی‌سازی داده.

دو مورد نخست را می‌توان از طریق طراحی مولکولی بهینه‌سازی کرد، در حالی که مورد سوم مسئله‌ای قدیمی در نظریه اطلاعات است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، طول زنجیر، عامل محدودکننده‌ای در سنتز تکرار شونده پلیمرهاست. بیشتر مطالعات گزارش شده به اولیگومرهایی در بازه ۳ تا ۲۰ واحدی پرداخته‌اند [۱۴]. Al Ouahabi و همکاران در سال ۲۰۱۵، سنتز پلی فسفودی استر رقمی با طول زنجیر ۱۰۶ واحدی را گزارش دادند و در سال ۲۰۱۷ توالی‌یابی زنجیری با ۷۷ واحد را انجام دادند [۲۱،۲۲].

### روش‌های تکرار شونده برای سنتز پلیمرهای رقمی

اصل سنتز تکرار شونده، شامل افزودن گام به گام و پیاپی واحدهای ساختاری مونومری به ترتیبی از پیش تعریف شده است تا طول و ترکیب مدنظر پلیمر به دست آید. نتیجه نهایی زنجیر پلیمری خطی، درختسان یا ماده‌ای در مقیاس نانو است که چارچوبی دقیقاً تعریف شده از گروه‌های عاملی دارد که در موقعیت‌های مشخصی قرار گرفته‌اند. نوع و انتخاب مونومر و واکنش اتصال در هر مرحله می‌تواند متفاوت باشد و تنها به خلاقیت سنتزکننده، قابلیت تولید مونومر و کارآمدی واکنش اتصال محدود می‌شود. این روش به ایجاد درشت‌مولکول‌هایی با ترکیب‌های غنی و متنوع با تعریفی دقیق در سطح مولکولی منجر می‌شود [۲۳،۲۴].

فرایند سنتزی اتصال تکرار شونده بدین ترتیب پیش می‌رود که در اولین واکنش یا مرحله تکرار شونده، مونومر [AB] به مولکول یا ساختار پایه با گروه عاملی مکمل افزوده می‌شود. پس از تکمیل مرحله اتصال [AB]، مونومر اضافی، واکنش دهنده‌ها و محصولات جانبی حذف می‌شوند. سپس دimer تازه تشکیل به‌عنوان پذیرنده مونومر بعدی، چه از طریق همان واکنش شیمیایی یا تبدیل شیمیایی متفاوت، عمل می‌کند. این فرایند ادامه می‌یابد تا توالی، طول و ترکیب مدنظر به دست آید. این روش تنها یک شرط دارد، مونومر مدنظر حداقل دارای دو انتهای واکنش‌پذیر باشد که بتوان از آن‌ها برای اتصال به درشت‌مولکول در حال رشد و مونومرهای آزاد استفاده کرد. اگرچه فرایند سنتز تکرار شونده عموماً کندتر و دشوارتر از روش‌های پلیمر شدن رشد مرحله‌ای یا رشد زنجیری



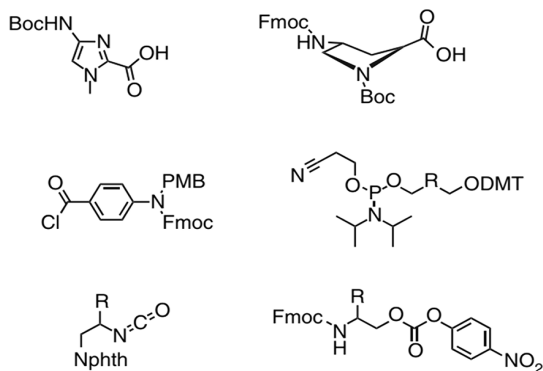
شکل ۵- فرایند تکراری برای سنتز پلیمرهای رقمی با استفاده از مونومرهای دو عاملی از نوع AB [۶].

است، اما در حال حاضر یکی از محدود رویکردهایی است که کنترل دقیق بر توالی مونومرها را تضمین می‌کند. شکل ۵، فرایندی تکراری برای سنتز پلیمرهای رقمی را با استفاده از مونومرهای دو عاملی از نوع AB نمایش داده است [۶].

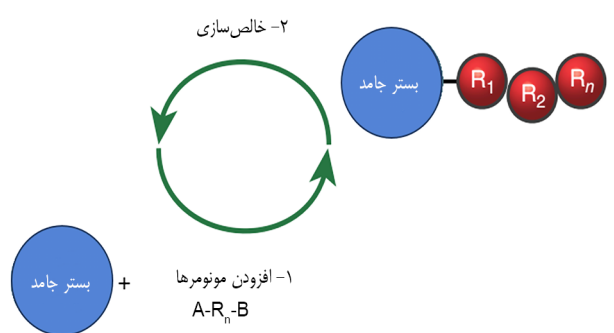
روش فاز جامد (solid-phase approach) در ابتدایین دهه‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ میلادی برای تولید پپتیدها و اولیگونوکلوپتیدها توسعه یافت [۲۵]. اساس این روش بر استفاده از یک رزین یا بستر شبکه‌ای شده برای اتصال زنجیر در حال رشد از طریق پیوندی شکست‌پذیر استوار است. اگرچه انجام واکنش روی فاز جامد باعث کاهش سرعت واکنش می‌شود، اما افزودن مقدار زیادی از مونومر می‌تواند برای افزایش سرعت و پیشبرد واکنش تا تکمیل آن به کار گرفته شود. از مزایای روش فاز جامد می‌توان به امکان خالص‌سازی سریع و در نتیجه زمان کوتاه‌تر سنتز اشاره کرد (شکل ۶) [۶]. اگرچه راهبرد اولیه سنتز فاز جامد برای تولید اولیگوپپتیدها توسعه یافته بود، اما استفاده از آن به طیف وسیعی از مونومرهای غیر طبیعی و ترکیبات اتصال‌دهنده گسترش یافت تا معماری‌های جدیدی از پلیمرهای با ترتیب کنترل شده ایجاد کند. چند پلیمر سنتزی با استفاده از رویکرد مونومر [AB]<sub>n</sub>+ [AB] ساخته شده‌اند [۶].

در پلیمر شدن‌های مرحله‌ای، مونومرهای چند عاملی با هم واکنش می‌دهند تا ساختارهای خطی، حلقوی یا شبکه‌ای ایجاد کنند. به‌عنوان مثال، مونومرهای دو عاملی که دارای دو گروه واکنش‌پذیر X و Y هستند، معمولاً به تولید پلیمرهای خطی منجر می‌شوند. در مقابل، دو مونومر XX و YY نیز می‌توانند به‌طور مشترک کوپلیمر شدن شوند. به‌طور کلی، پلیمر شدن‌های مرحله‌ای روش‌های ساده‌ای هستند، اما معمولاً کنترل ضعیفی بر طول زنجیر و توزیع جرم مولکولی ایجاد می‌کنند [۲۶]. از نظر تنظیم توالی مونومرها نیز این پلیمر شدن‌ها به دلیل سازوکار ساده آن‌ها محدود هستند. با وجود این پلیمر شدن‌های مرحله‌ای، گزینه‌های جالبی برای تهیه کوپلیمرهای تناوبی محسوب می‌شوند. از دیگر روش‌های به کار رفته برای سنتز پلیمرهای رقمی، استفاده از واکنش‌های کلیک است. از زمان معرفی مفهوم شیمی کلیک در سال ۲۰۰۱ توسط Sharpless و همکاران [۲۷]، این مفهوم اثر شگرفی بر بسیاری از حوزه‌های پژوهشی

A-R<sub>n</sub>-B



(ب)

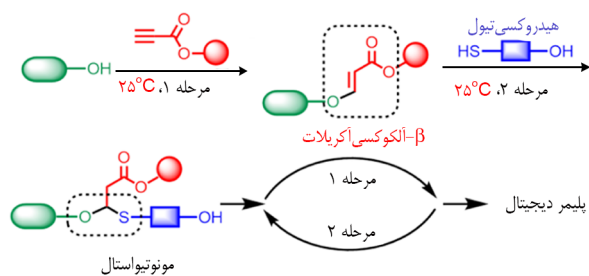


(الف)

شکل ۶- (الف) روش فاز جامد با استفاده از مونومرهای نوع [AB]<sub>n</sub> و (ب) نمونه‌هایی از مونومرهای نوع [AB] استفاده شده در سنتز فاز جامد [۶].

می‌شود. این فرایند از ترکیبات اولیه و مونومرهای در دسترس در شرایط محیطی انجام شد و در مجموع طی ۱۱ مرحله، بازده کلی ۵۴٪ را ارائه داد. توالی این پلیمرهای خطی به راحتی با استفاده از روش طیف‌سنجی جرمی پی‌پی (tandem mass spectroscopy, MS/MS) رمزگشایی می‌شود.

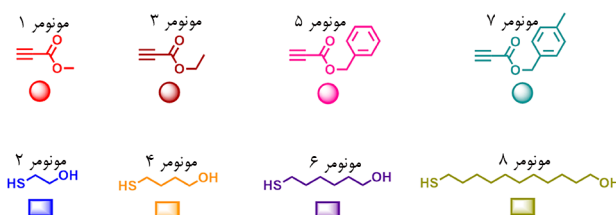
کتابخانه مونومری تعریف شده برای سنتز این پلیمرهای رقمی در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۸، روش کلی سنتز پلیمرهای رقمی با توجه به مونومرهای معرفی شده در شکل ۷ نشان داده شده است. این سنتز شامل واکنش‌های تکراری از واکنش گروه عاملی هیدروکسیل با گروه آلکینی و در ادامه واکنش گروه عاملی تیولی با آلکن به دست آمده از واکنش مرحله قبل است. شکل ۹ بیانگر کدهای دودویی اختصاص یافته به هریک از مونومرهای معرفی شده در شکل ۷ است. به عنوان مثال، برای تشکیل رشته کد دودویی ۰۱۱۰۰۰۱۱۰۱۱۱۱۱۰۰۰۱۱، توالی مونومرهای به کاررفته در ساختار پلیمر رقمی مطابق شکل ۱۰ است.



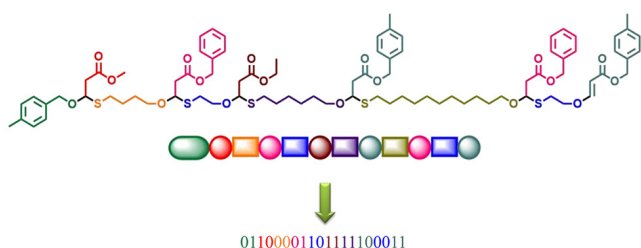
شکل ۸- روش کلی سنتز پلیمر رقمی برپایه واکنش کلیک هیدروکسیل-این و تیول-ان [۲۸].

گذاشته است. امروزه گروه‌های پژوهشی بسیاری در سراسر جهان از شیمی کلیک استفاده می‌کنند. این عنوان ارزشمند به واکنش‌هایی تعلق می‌گیرد که دامنه کاربرد گسترده‌ای دارند، فضاویژه هستند و عموماً محصولات جانبی تولید نمی‌کنند. شیمی کلیک به سرعت پس از معرفی آن استفاده شد و باعث جهش در سنتز پلیمرهای پیچیده و حاوی گروه‌های عاملی شد. ساختارهای درشت مولکولی که پیش‌تر یا غیرممکن به نظر می‌رسیدند یا در مقیاس کوچک و با فرایندهای پیچیده سنتز و خالص‌سازی به دست می‌آمدند، اکنون با استفاده از شیمی کلیک، قابل تولیدند.

Song و همکاران [۲۸] با استفاده از واکنش‌های کلیک میان هیدروکسیل-این و تیول-ان توانستند نوعی پلیمر رقمی سنتز کنند که در آن توالی مونومری کاملاً مشخص و از پیش تعریف شده است. در این مطالعه روش شیمیایی کارآمد، بدون نیاز به گروه‌های محافظ و استفاده از فلزات با محصولات جانبی بسیار کم توسعه داده شد. در این روش، با ترکیب واکنش‌های کلیک هیدروکسیل-این و تیول-ان، سنتز مؤثر اولیگومونوتیوآستال‌های با توالی مشخص امکان‌پذیر



شکل ۷- کتابخانه مونومری تعریف شده برای سنتز پلیمر رقمی برپایه واکنش کلیک هیدروکسیل-این و تیول-ان [۲۸].



شکل ۱۰- توالی مونومرهای به کاررفته در ساختار پلیمر رقمی برای نوشتن کد دودویی ۰۱۱۰۰۰۰۱۱۰۱۱۱۱۱۰۰۰۱۱ [۲۸].

از ابزارهای اساسی در مطالعات مربوط به تعیین ساختار مولکولی تبدیل شده است [۳۱].

ذخیره‌سازی اطلاعات اغلب به‌عنوان یکی از کاربردهای اصلی پلیمرهای رقمی مطرح می‌شود. مشخص است، کوپلیمرها، ترپلیمرها و غیره دارای تعداد بسیار زیادی توالی‌های بالقوه بوده و از لحاظ نظری، غنای اطلاعاتی زیادی دارند. همچنین، ذخیره‌سازی اطلاعات یکی از واضح‌ترین حوزه‌هایی است که در آن ترتیب دقیق واحدهای مونومری برای موفقیت بسیار حیاتی است. با وجود روش‌های گسترده طیف‌سنجی جرمی پیاپی برای تعیین توالی درشت‌مولکول‌های سنتزی، اطلاعات رمزگذاری شده در یک درشت‌مولکول دارای توالی مشخص را می‌توان بازیابی کرد [۳۲]. برای نام‌گذاری مجموعه‌یون‌هایی که در طیف‌های MS/MS مشاهده می‌شوند، نوعی نظام نام‌گذاری ویژه ابداع شده یا از نظام‌های موجود برای زیست‌پلیمرها الهام گرفته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، در این روش، قطعه‌های



شکل ۹- کدهای دودویی اختصاص‌یافته برای مونومرهای معرفی شده در کتابخانه [۲۸].

### مقایسه روش‌های نوشتن اطلاعات روی زنجیرهای پلیمری

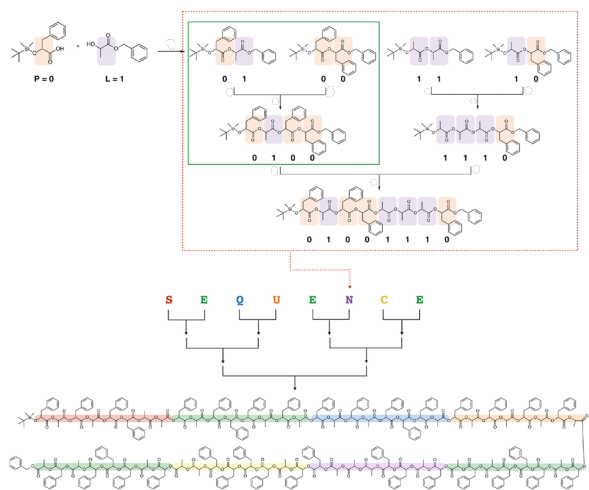
روش‌هایی که برای نوشتن اطلاعات روی زنجیرهای پلیمری ذکر شد، شامل سنتز در بستر فاز جامد، پلیمرشدن مرحله‌ای و واکنش‌های کلیک بود. هرکدام از این روش‌ها، مزایا و معایبی دارند که در جدول ۱، مقایسه جامع این روش‌ها ارائه شده است.

### روش‌های خواندن اطلاعات ذخیره‌شده روی پلیمرهای رقمی

طیف‌سنجی جرمی پیاپی (MS/MS) روشی است که اطلاعات ساختاری درباره‌ی مولکول‌های یونیده ارائه می‌دهد و براساس نحوه شکسته شدن آن‌ها پس از برانگیختگی عمل می‌کند [۲۹]. از آنجاکه ماهیت قطعه‌ها یا یون‌های حاصل به ساختار یون درحال شکست مرتبط است، تحلیل این قطعه‌ها می‌تواند اطلاعاتی درباره‌ی نحوه اتصال گروه‌های عاملی در مولکول اصلی فراهم کند، به شرط آنکه نحوه شکست مولکول مشخص باشد [۳۰]. از زمان توسعه اولیه این روش در اواسط دهه ۱۹۷۰، طیف‌سنجی جرمی پیاپی به یکی

جدول ۱- مقایسه روش‌های نوشتن اطلاعات روی زنجیرهای پلیمری.

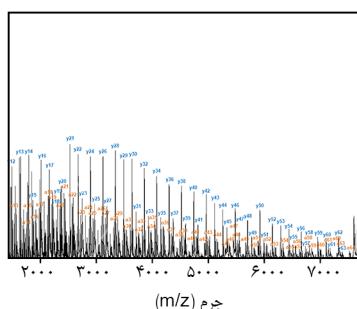
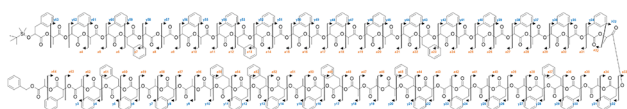
روش نوشتن اطلاعات	مزایا	معایب	ظرفیت ذخیره‌سازی	دقت	پلیمرهای استفاده شده
فاز جامد	کنترل دقیق توالی مونومری، خالص‌سازی سریع و تنوع سنتزی زیاد	زمان سنتز طولانی و مقیاس آزمایشگاهی	بسیار زیاد	بسیار زیاد	اولیگوپورتان و پپتیدها
واکنش‌های کلیک	عدم نیاز به گروه‌های محافظ، عدم استفاده از فلزات و محصولات جانبی بسیار کم	بازده کم و غیرقابل استفاده در مقیاس صنعتی	زیاد	زیاد	اولیگوتتری‌آزول و اولیگوتیوآستال
پلیمرشدن مرحله‌ای	ساده بودن، قابل استفاده در مقیاس صنعتی و سریع بودن	کنترل کم بر توالی مونومری	متوسط	کم	اولیگوکربنات و اولیگوآمید



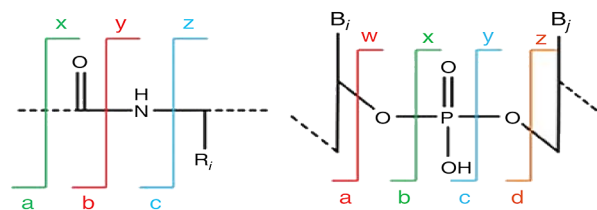
شکل ۱۲- طرحواره‌ای از راهبرد همگرایی عرضی سنتز PCL برای نوشتن واژه ۶۴ بیتی SEQUENCE [۳۴].

طیف‌سنجی جرمی پیاپی MS/MS در حالت یون مثبت رمزگشایی شد. زیرا، این روش نسبت سیگنال به نوفه زیادی دارد و می‌تواند الگوهای شکست پلیمرهای با جرم مولکولی زیاد را شناسایی کند. شکل ۱۳ طیف MS/MS پلیمر رقمی سنتز شده برای نوشتن واژه SEQUENCE را نشان می‌دهد.

به منظور بهبود ظرفیت ذخیره‌سازی این پلیمرهای رقمی می‌توان به پژوهش Laurent و همکاران در سال ۲۰۲۱ اشاره کرد. در این پژوهش، یک تک‌چهره پیکسلی از آنتوان لاوازیه در یک پلی‌فسفودی‌استر با کدگذاری رقمی ذخیره شد [۳۵]. ظرفیت ذخیره‌سازی به دست آمده در این پژوهش ۴۴۰ بیت در هر زنجیر بود که بیشترین میزان گزارش شده برای یک پلیمر رقمی



شکل ۱۳- طیف MALDI-MS/MS همراه با نمایش پیک‌های مربوط به ترکیب ۶۴ بیتی واژه SEQUENCE [۳۴].



شکل ۱۱- مثال‌هایی از روش نام‌گذاری قطعه‌های شکسته‌شده در طیف‌سنجی MS/MS [۳۳].

شکسته‌شده با حرفی نام‌گذاری می‌شوند که با این معیار تعیین می‌شوند: انتهای زنجیری که همچنان در قطعه باقی مانده است با حروف ابتدایی الفبای انگلیسی برای یون‌های انتهای چپ زنجیر و حروف انتهایی الفبای انگلیسی برای یون‌های انتهای راست زنجیر مشخص می‌شوند. به عنوان مثال شکستن پیوند اول، دوم، سوم و غیره به ایجاد قطعه‌های a, b, c, و غیره هنگام شمارش از چپ به راست یا قطعه‌های x, y, z و غیره هنگام شمارش از راست به چپ منجر می‌شود [۳۳].

### ذخیره‌سازی اطلاعات و رمزگذاری روی پلیمرهای رقمی

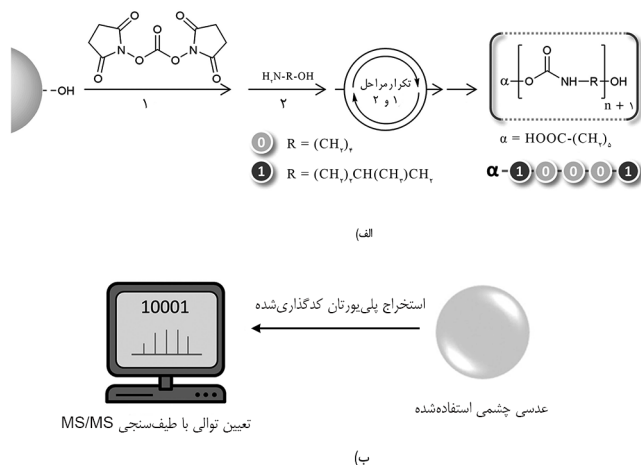
برای نشان دادن ظرفیت ذخیره‌سازی پلیمرهای رقمی، می‌توان به پژوهشی اشاره کرد که در آن سنتز پلی (آلفاهیدروکسی اسید) (PAH) از تعداد زیادی مونومر با توالی کاملاً مشخصی انجام شده است [۳۴]. نشان داده شده است، می‌توان اطلاعات رقمی را در توالی مشخصی از پلی (فنیل لاکتیک-کو-لاکتیک اسید) (PCL) ذخیره کرد. این پلیمر از طریق ترجمه مستقیم کد دودویی به ساختار شیمیایی با استفاده از چهار دوتایی از مونومرها به عنوان واحدهای تشکیل‌دهنده ساخته شده است. این فرایند، روش همگرایی عرضی (cross-convergent) نام‌گذاری شده است. واژه ۶۴ بیتی ذخیره شده SEQUENCE می‌تواند به طور کامل به عنوان کد دودویی در توالی‌یابی طیف‌سنجی جرمی پیاپی باز یابی شود. در این مطالعه، فنیل لاکتیک اسید (P) و لاکتیک اسید (L) به عنوان مونومرهایی استفاده شد که به ترتیب نشانگر ۰ و ۱ هستند. هر توالی از یک کوپلی‌استر (PCL)، می‌تواند به عنوان ترکیبی از جای‌گشت‌های مونومرهای تشکیل‌دهنده بیان شود. برای توالی دودویی، جای‌گشت‌های ۰ و ۱، چهار ترکیب (۰۰، ۰۱، ۱۰ و ۱۱) را تولید می‌کنند که به ساختارهای شیمیایی متشکل از دو مونومر (دیادها) ترجمه‌پذیرند (شکل ۱۲). توالی‌یابی جرمی PCL با روش MALDI-TOF انجام شد. توالی PCL با استفاده از روش



بازیابی اطلاعات در مقایسه با دستگاه‌های ذخیره‌سازی بر پایه سیلیکون است. اگرچه پلیمرهای رقمی چگالی ذخیره‌سازی زیادی دارند، اما فرایندهای رمزنگاری و رمزگشایی که اغلب متکی بر طیف‌سنجی جرمی پیایی هستند، هنوز برای بازیابی سریع داده‌ها بهینه نشده‌اند. این موضوع کاربرد آن‌ها را در سامانه‌های ذخیره‌سازی در مقیاس وسیع یا کاربردهای آبی محدود می‌کند. پایداری این پلیمرها تحت شرایط محیطی مختلف نیز چالشی اساسی است. بسیاری از پلیمرهای با توالی تعریف‌شده، پایداری گرمایی و شیمیایی محدودی دارند که ممکن است در دماهای زیاد مانند فرایندهای اکستروود کردن مذاب تأثیر بپذیرند. افزون بر این، برخی از این پلیمرها در مواجهه طولانی مدت با پرتوهای فرابنفش، رطوبت یا آنزیم‌ها ممکن است دچار تخریب یا تغییرات ساختاری شوند که دوام طولانی مدت آن‌ها را محدود می‌کند. ادغام این پلیمرها در چارچوب‌های فناورانه موجود نیز چالش دیگری محسوب می‌شود. برخلاف ذخیره‌سازی بر پایه سیلیکون که دارای زیرساخت‌های تولید و بازیابی داده‌های تثبیت‌شده است، سامانه‌های ذخیره‌سازی بر پایه پلیمرهای رقمی نیازمند توسعه سامانه‌های جدیدی برای خواندن و نوشتن داده‌ها هستند. این امر مستلزم پژوهش‌ها و توسعه بیشتر برای ایجاد ارتباط بین ذخیره‌سازی مولکولی و فناوری‌های محاسباتی مرسوم است [9].

### چشم اندازها

با وجود رشد چشمگیر در حوزه پلیمرهای رقمی، این حوزه همچنان در مراحل ابتدایی آن قرار دارد، به‌ویژه در مقایسه با دستگاه‌های ذخیره‌سازی الکتریکی، نوری و مغناطیسی که سال‌هاست توسعه یافته‌اند. برای دستیابی به کاربردهای عملی، چالش‌های فناورانه متعدد در سازوکارهای نوشتن و خواندن اطلاعات باقی مانده است. فرایند ساخت پلیمرهای سنتزی رقمی اغلب زمان‌بر بوده و به‌سختی در مقیاس زیاد انجام‌پذیر است که به هزینه نسبتاً زیاد تولید منجر می‌شود. با این حال، استفاده از ترکیبات شیمیایی ارزان‌قیمت به‌عنوان واحدهای کدگذاری شده می‌تواند به ساخت حامل‌های اطلاعاتی درشت مولکولی کمک کند. همچنین گسترش سنتز در مقیاس صنعتی از طریق توسعه روش‌های سنتز خودکار با بهره‌گیری از فناوری رباتیک و شیمی جریان می‌تواند هزینه‌های رمزگذاری اطلاعات در پلیمرهای رقمی با توالی تعریف‌شده را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. از سوی دیگر، رمزگشایی اطلاعات از پلیمرهای رقمی به‌شدت به فن‌های طیف‌سنجی جرمی وابسته است. گرچه این تجهیزات تنها یک‌بار خریداری می‌شوند، اما



شکل ۱۶- (الف) مسیر کلی استفاده‌شده برای سنتز در بستر فاز جامد پلی‌یورتان‌های کدگذاری‌شده و (ب) نحوه بررسی اصل یا تقلبی بودن عدسی چشمی بررسی شده [۳۶].

محلول تراهدروفران حاوی برچسب‌های پلی‌یورتان متورم شده و سپس خشک می‌شوند. هر دو روش امکان واردسازی موفق برچسب‌های پلی‌یورتانی در شبکه‌های متاکریلاتی را فراهم می‌سازند. به‌منظور اثبات این موضوع، برچسب‌ها با استفاده از روش تورم در حلال از عدسی‌ها استخراج شده و با طیف‌سنجی جرمی پیایی شناسایی می‌شوند. در تمام موارد، برچسب‌ها شناسایی می‌شوند که توالی‌های رمزگذاری‌شده آن‌ها با روش طیف‌سنجی جرمی پیایی تشخیص‌پذیر هستند. سپس اصل یا تقلبی بودن عدسی به‌دست آمده با طیف‌سنجی جرمی پیایی بررسی می‌شود. شکل ۱۶، روش سنتز و چگونگی بررسی اصل یا تقلبی بودن عدسی‌ها را نشان می‌دهد.

### چالش‌ها

پلیمرهای رقمی با توالی تعریف‌شده با وجود داشتن قابلیت بالقوه زیاد با محدودیت‌هایی مواجه‌اند که کاربرد گسترده آن‌ها را دشوار می‌سازد. یکی از چالش‌های اصلی، پیچیدگی و هزینه زیاد سنتز این پلیمرهاست. برخلاف پلیمرهای معمولی که با روش‌های پلیمرشدن صنعتی و نسبتاً ساده تولید می‌شوند، پلیمرهای با توالی تعریف‌شده نیازمند راهبردهای سنتزی دقیق مانند سنتز فاز جامد مرحله‌ای یا روش‌های رشد تکرار شونده هستند. این روش‌ها زمان‌بر بوده و به مواد اولیه گران‌قیمت نیاز دارند که تولید در مقیاس صنعتی را از نظر اقتصادی دشوار می‌کند [۶].

یکی دیگر از محدودیت‌های مهم، سرعت کم ذخیره‌سازی و

گران‌قیمت و حجیم هستند. افزون‌براین طی فرایند رمزگشایی با MS/MS، مولکول‌های پلیمر تخریب می‌شوند و تحلیل داده‌ها نیز زمان‌بر است. برای رفع این معایب، توسعه دستگاه‌های رمزگشایی غیرمخرب و کوچک‌تر نظیر فناوری توالی‌یابی با نانوحفره (nanopore sequencing) مورد نیاز است. همچنین، بهره‌برداری از ابزارهای رمزگشایی دستی و ارزان‌قیمت نیز باید مدنظر قرار گیرند [۵].

## نتیجه‌گیری

پلیمرهای رقمی به‌عنوان راهکاری نوآورانه در ذخیره‌سازی اطلاعات و برچسب‌گذاری مولکولی، افق‌های جدیدی را در علم مواد و فناوری اطلاعات ایجاد کرده‌اند. این پلیمرها با امکان رمزنگاری دقیق و بازیابی اطلاعات در مقیاس مولکولی،

جایگزین بالقوه‌ای را برای وسایل ذخیره‌سازی مرسوم و ابزارهای ضد جعل ارائه می‌دهند. قابلیت استفاده از آن‌ها در مواد پلیمری و قطعه‌های سه‌بعدی، نشانگر کاربردهای گسترده در صنایع مختلف از جمله امنیت داده‌ها، پزشکی و بسته‌بندی هوشمند است. با توجه به گستردگی روش‌های سنتزی و تنوع ذخیره‌سازی اطلاعات در پلیمرهای رقمی و با پیشرفت‌های حاصل در آینده در روش‌های سنتز، بهینه‌سازی فرایندهای رمزگذاری و رمزگشایی و توسعه سامانه‌های کارآمد برای ادغام این پلیمرها در فناوری‌های کامپیوتری، می‌توان انتظار داشت، پلیمرهای رقمی به بستری پایدار و مقیاس‌پذیر برای ذخیره‌سازی اطلاعات و احراز هویت تبدیل شوند. سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های بنیادی و کاربردی در این حوزه می‌تواند زمینه را برای بهره‌برداری گسترده‌تر از این مواد در صنایع پیشرفته فراهم کند و تحولی اساسی در نحوه ذخیره‌سازی و امنیت داده‌ها ایجاد کند.

## مراجع

- Huang J. and Turner S.R., Recent Advances in Alternating Copolymers: The Synthesis, Modification, and Applications of Precision Polymers, *Polymer*, **116**, 572-586, 2017.
- Yokota K., Periodic Copolymers, *Prog. Polym. Sci.*, **24**, 517-563, 1999.
- Matyjaszewski K., Ziegler M.J., Arehart S.V., Greszta D., and Pakula T., Gradient Copolymers by Atom Transfer Radical Copolymerization, *J. Phys. Org. Chem.*, **13**, 775-786, 2000.
- Lutz J.F., Ouchi M., Sawamoto M., and Meyer T.Y., Sequence-Controlled Polymers: Synthesis, Self-Assembly, and Properties, *ACS. Sym. Ser.*, **1170**, 1-3, 2014.
- Yu L., Chen B., Li Z. et al., Digital Synthetic Polymers for Information Storage, *Chem. Soc. Rev.*, **52**, 1529-1548, 2023.
- Lutz J.F., *Sequence - Controlled Polymers*, John Wiley and Sons, New York, 1-26, 2018.
- Gil - Ramirez G., Leigh D.A. and Stephens A.J., Catenanes: Fifty Years of Molecular Links, *Angew. Chem. Int. Edit.*, **54**, 6110-6150, 2015.
- Thorn K., Genetically Encoded Fluorescent Tags, *Mol. Biol. Cell.*, **28**, 848-857, 2017.
- Ceze L., Nivala J., and Strauss K., Molecular Digital Data Storage Using DNA, *Nat. Rev. Genet.*, **20**, 456-466, 2019.
- Colquhoun H. and Lutz J.F., Information-Containing Macromolecules, *Nat. Chem.*, **6**, 455-456, 2014.
- Lutz J.F., Coding Macromolecules: Inputting Information in Polymers Using Monomer-Based Alphabets, *Macromol-ecules*, **48**, 4759-4767, 2015.
- Shuluk J.R., Wight C.D., Howard J.R. et al., A Workflow Enabling the Automated Synthesis, Chain-End Degradation, and Rapid Mass Spectrometry Analysis for Molecular Information Storage in Sequence-Defined Oligourethanes, *J. Am. Chem. Soc. Au.*, **5**, 1232-1242, 2025.
- Lutz J.F., Ouchi M., Liu D.R., and Sawamoto M., Sequence-Controlled Polymers, *Science*, **341**, 1238149, 2013.
- Rutten M.G., Vaandrager F.W., Elemans J.A., and Nolte R.J., Encoding Information into Polymers, *Nat. Rev. Chem.*, **2**, 365-381, 2018.
- Trinh T.T., Oswald L., Chan - Seng D., and Lutz J.F., Synthesis of Molecularly Encoded Oligomers Using a Chemoselective "AB+CD" Iterative Approach, *Macromol. Rapid. Commun.*, **35**, 141-145, 2014.
- Roy R.K., Meszynska A., Laure C. et al., Design and Synthesis of Digitally Encoded Polymers that can be Decoded and Erased, *Nat. Commun.*, **6**, 7237, 2015.
- Al Ouahabi A., Charles L., and Lutz J.F., Synthesis of Non-Natural Sequence-Encoded Polymers using Phosphoramidite Chemistry, *J. Am. Chem. Soc.*, **137**, 5629-5635, 2015.
- Karamessini D., Poyer S., Charles L., and Lutz J.F., 2D Sequence - Coded Oligourethane Barcodes for Plastic Materials Labeling, *Macromol. Rapid. Commun.*, **38**, 1700426, 2017.
- Cavallo G., Al Ouahabi A., Oswald L., Charles L., and Lutz J.F., Orthogonal Synthesis of "Easy-to-Read" Information-

- Containing Polymers Using Phosphoramidite and Radical Coupling Steps, *J. Am. Chem. Soc.*, **138**, 9417-9420, 2016.
20. Boukis A.C. and Meier M.A., Data Storage in Sequence-Defined Macromolecules via Multicomponent Reactions, *Eur. Poly. J.*, **104**, 32-38, 2018.
21. Al Ouahabi A., Kotera M., Charles L., and Lutz J.F., Synthesis of Monodisperse Sequence-Coded Polymers with Chain Lengths Above DP100, *ACS. Macro. Lett.*, **4**, 1077-1080, 2015.
22. Al Ouahabi A., Amalian J.A., Charles L., and Lutz J.F., Mass Spectrometry Sequencing of Long Digital Polymers Facilitated by Programmed Inter-Byte Fragmentation, *Nat. Commun.*, **8**, 1-8, 2017.
23. Comby - Zerbino C., Lutz J.F., MacAleese L., and Charles L., Combining Laser - Induced Edition to Collision - Induced Sequencing of Digital Oligomers in a Single Gas - Phase Experiment, *Rapid. Commun. Mass. Spectrosc.*, 1-10, 2025.
24. Badi N. and Lutz J.F., Sequence Control in Polymer Synthesis, *Chem. Soc. Rev.*, **38**, 3383-3390, 2009.
25. Merrifield R., Solid-Phase Peptide Syntheses, *Endeavour*, **24**, 3-7, 1965.
26. Huang X., Yang Z., Yang X. et al., New Wine in Old Bottle: Crown Ether-Functionalized Digital Polymer toward Efficient MALDI-TOFMS/MS Decoding via a Classical Supramolecular Interaction, *ACS Macro. Lett.*, **13**, 979-986, 2024.
27. Kolb H.C., Finn M.G., and Sharpless K.B., Click Chemistry: Diverse Chemical Function from a Few Good Reactions, *Angew. Chem. Int. Edit.*, **40**, 2004-2021, 2001.
28. Song B., Lu D., Qin A., and Tang B.Z., Combining Hydroxyl-Yne and Thiol-Ene Click Reactions to Facilely Access Sequence-Defined Macromolecules for High-Density Data Storage, *J. Am. Chem. Soc.*, **144**, 1672-1680, 2021.
29. Zhilin Y.A.N.G., Suhua D.U.A.N., Qiunan S.H.I. et al., Synthesis and Sequencing of Novel Digital Polyesters, *J. Funct. Polym.*, **36**, 535-543, 2023.
30. Launay K., Amalian J.A., Laurent E. et al., Precise Alkoxyamine Design to Enable Automated Tandem Mass Spectrometry Sequencing of Digital Poly(phosphodiester)s, *Angew. Chem- Ger Edit.*, **133**, 930-939, 2021.
31. Benninghoven A. and Loebach E., Tandem Mass Spectrometer for Secondary Ion Studies, *Rev. Sci. Instrum.*, **42**, 49-52, 1971.
32. Charles L., Laure C., Lutz J.F., and Roy R.K., Tandem Mass Spectrometry Sequencing in the Negative Ion Mode to Read Binary Information Encoded in Sequence - Defined Poly(alkoxyamine amide)s, *Rapid. Commun. Mass. Spectrosc.*, **30**, 22-28, 2016.
33. McLuckey S.A., Van Berkel G.J., and Glish G.L., Tandem Mass Spectrometry of Small, Multiply Charged Oligonucleotides, *J. Am. Soc. Mass. Spectrosc.*, **3**, 60-70, 1992.
34. Lee J.M., Koo M.B., Lee S.W. et al., High-Density Information Storage in an Absolutely Defined Aperiodic Sequence of Monodisperse Copolyester, *Nat. Commun.*, **11**, 1-9, 2020.
35. Laurent E., Amalian J.A., Schutz T. et al., Storing the Portrait of Antoine de Lavoisier in a Single Macromolecule, *C.R. Chim.*, **24**, 69-76, 2021.
36. Karamessini D., Petit B.E., Bouquey M., Charles L., and Lutz J.F., Identification - Tagging of Methacrylate - Based Intraocular Implants Using Sequence Defined Polyurethane Barcodes, *Adv. Funct. Mater.*, **27**, 1604595, 2017.