

اهمیت و جایگاه پژوهش‌های نظری در علوم و مهندسی پلیمر

Importance and Situation of Theoretical Researches in Polymer Science and Engineering

مجید غیاث

پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۵-۱۴۹۶۵

صنایع و محصولات پلیمری در سده گذشته نقش بسیار قابل توجهی در پیشرفت زندگی بشر داشته است. در ابتدا، تولید فراورده‌های پلیمری صرفاً بر مبنای مشاهدات آزمایشگاهی و صنعتی بود و هر گونه ابداع و نوآوری بر اساس تجربیات قبلی و آزمون‌های حدس و تکرار انجام می‌شد. با حصول پیشرفت در رشته‌های مختلف علوم، روش‌های شناسایی، نوآوری‌های رایانه‌ای، ملاحظات اقتصادی، رقابت تولیدکنندگان مختلف و تولید محصولات با کاربردهای جدید، نیاز به تبیین و تشریح نظری فرایندهای علوم و مهندسی مواد پلیمری و توانایی انجام این کار به سرعت افزایش یافت. در این پژوهش، انواع نگرش‌های ریاضی و محاسباتی کاربردی موجود برای تجزیه و تحلیل فرایندهای مربوط به علوم و مهندسی صنایع و فناوری مواد پلیمری، تفاوت‌های بنیادین میان مواد ساده و ترکیبات پلیمری و اهمیت و دلایل بهبود نگرش‌های نظری مربوط به فرایندهای پلیمری مورد بحث قرار گرفته است. دلایل تمایل اندک به انجام پژوهش‌های نظری مرتبط با علوم و مهندسی مواد پلیمری و انجام پژوهش‌های متعدد با نگرش تجربی نیز بررسی و بحث شده است. دو دیدگاه متداول در تجزیه و تحلیل فرایندهای پلیمری شامل دیدگاه‌های جبرگرایانه و تصادفی بحث شده و به نگرش‌های نوین بر مبنای ماهیت آماری و تصادفی و کاربرد آنها در تشریح رفتار مواد پلیمری اشاره شده است. گسترش و ترویج روش‌های ریاضی محاسباتی در تشریح فرایندهای مرتبط با علوم و صنایع پلیمری، فراهم کردن هر چه بیشتر زیرساخت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برای دانش‌آموختگان رشته‌های پلیمری و جهت‌گیری پژوهش‌های نظری در علوم و مهندسی پلیمر از نیازهای اساسی در چشم انداز علوم و صنایع پلیمری کشور است.

بسیار ش
فصلنامه پژوهشی-آموزشی
سال اول، شماره ۱
صفحه ۴۶-۳۷، ۱۳۹۰
ISSN:2252-0449

چکیده



مجید غیاث

واژگان کلیدی

نظری،
مدل‌سازی،
روش‌های ریاضی،
پلیمر،
فناوری

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

m.ghiass@ippi.ac.ir

اشتادینگر را می‌توان نخستین نگرش نظری در تشریح رفتار پلیمرها دانست [۴-۲]. از سوی دیگر، به علت ساختار پیچیده مولکولی ترکیبات پلیمری و ماهیت متفاوت آنها، قوانین فیزیکی و مکانیکی که برای مواد ساده تعریف و ابداع شده‌اند، کارایی خود را از دست داده‌اند و نیاز به بهبود دارند یا حتی نیاز به تدوین قوانین جدید را ایجاب می‌کنند.

ترکیبات پلیمری دارای ساختار مولکولی زنجیری یا شبکه‌ای هستند که در محیط‌های مختلف رفتارهای بسیار متفاوتی با مواد ساده نشان می‌دهند. همین امر باعث می‌شود، پیش‌بینی رفتار آنها مطابق با رفتار مواد ساده غیرپلیمری نباشد. این عوامل باعث شده‌اند تا تعداد قابل ملاحظه‌ای از پژوهشگران علوم و تکنولوژی پلیمری در زمینه‌های تجربی به پژوهش بپردازند.

به تدریج و با توجه به تخصصی شدن حوزه عملکرد و کاربرد مواد پلیمری، نیاز به ابداع محصولاتی با خواص بسیار پیچیده و تخصصی، در نظر گرفتن عوامل اقتصادی و صرفه‌جویی در هزینه‌ها، نیاز به وجود دیدگاه‌های نظری در تشریح فرایندهای مربوط به مواد پلیمری احساس و فضا برای ارائه مباحث نظری و پیش‌بینی رفتار مواد پلیمری مساعد شد.

امروزه مباحث نظری مربوط به مواد پلیمری و روش‌های تجزیه و تحلیل غیرعملی و آزمایشگاهی بخش بسیار مهمی از دانش مواد پلیمری را به خود اختصاص داده است، به نحوی که در پاره‌ای از موارد مطالعات صرفاً نظری بدون نیاز به انجام فعالیت‌های تجربی راه‌گشای حل بسیاری از مسائل مربوط به مواد پلیمری بوده است. در حال حاضر، با توجه به پیشرفت‌های شگرف و دستاوردهای عظیم برای فراهم آوردن تسهیلات محاسباتی شامل کامپیوترهای پیش‌رفته و نرم‌افزارهای قوی و به همراه آنها ابداع روش‌های تجزیه و تحلیل ریاضی و نظری، محاسبات مربوط به مفاهیم علوم و مهندسی پلیمر بسیار گسترده شده است، به نحوی که مشکلات به نظر لاینحل دهه‌های پیشین به مسائل ساده امروزی تبدیل شده است. گسترش روش‌ها و فنون جدید، افق‌های نوینی در تجزیه و تحلیل فرایندهای مواد پلیمری و به طور هم‌زمان نوآوری‌های بسیار متنوعی در زمینه ارائه محصولات پلیمری جدید، جای‌گزینی آنها با بسیاری از ترکیبات دیگر و تهیه محصولات جدید گشوده است که پیش از این دسترس‌ناپذیر به نظر می‌رسید [۷-۴].

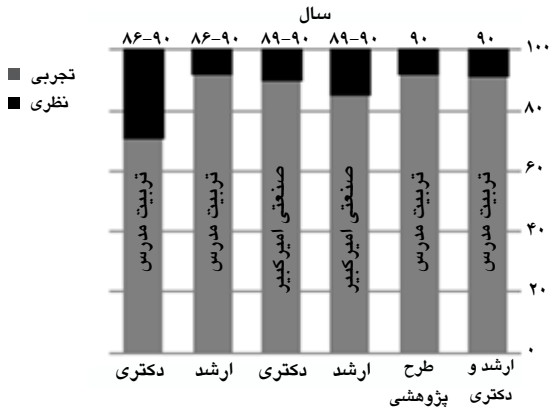
باوجود گسترش نگرش‌های نظری، هنوز هم بخش قابل ملاحظه‌ای از پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌های مختلف علوم و مهندسی مواد پلیمری با تاکید بر جنبه‌های تجربی و عملی انجام

امروزه مواد پلیمری نقش بسیار گسترده و کاربردهای متنوعی در زمینه‌های مختلف زندگی بشر دارد. حضور مواد مختلف پلیمری به شکل‌های متنوع از ظروف یک‌بار مصرف تا مواد جایگزین اندام‌های انسانی بیانگر اهمیت و قابلیت به کارگیری این ترکیبات است. از ابتدای معرفی و ابداع ترکیبات پلیمری، یعنی نزدیک به صد سال پیش تا به امروز، محصولات متعددی با کاربردهای بسیار متنوع با خواصی متفاوت یا حتی متضاد ارائه و مصرف شده‌اند. علم شناخت مواد پلیمری بر اثر نیاز روزافزون به ارائه محصولات جدید و درک چگونگی رفتار انواع محصولات مورد نیاز صنعت، در آزمایشگاه‌های پژوهشی کارخانه‌های بزرگ متولد شد، رشد کرد و به مراکز آموزشی و دانشگاهی راه یافت [۳-۱].

تولید محصولات پلیمری، مانند سایر علوم مربوط به مواد مهندسی، ابتدا بر مبنای تجربیات فنی و صنعتی بوده و هر گونه بهبود کیفیت و تغییر خواص با توجه به کاربرد ویژه آنها و بر اساس مقایسه با نمونه‌های موجود بوده است. به عبارت دیگر، هر گونه ابداع و نوآوری در جهت ارائه یک محصول پلیمری، صرف‌نظر از موارد تصادفی، بر مبنای انجام آزمایش‌های متنوع و متعدد و صرفاً به منظور رسیدن به خواص کاربرد نهایی بوده است. تقاضای مصرف بسیار زیاد، به همراه نوآوری و ارائه محصولات جدید در میانه سده گذشته، به ویژه پس از جنگ جهانی دوم، باعث شد تا مهندسان و متخصصان با تکیه بر تجربیات ارزشمند عملی و روش‌های فنی تولید، همواره برتری نسبی کاربردی را در صنایع تولید مواد پلیمری در دست داشته باشند.

تنوع مواد پلیمری و آمیخته‌های آنها، روش‌های متنوع تولید و فرورش این مواد برای رسیدن به خواص مطلوب، شاه‌راهی مطمئن را در برابر متخصصان و پژوهشگران تجربی مواد پلیمری فراهم کرده است که تا مدت‌ها تمایلی برای عبور از این مرز و نگاه و نگرش متفاوت با دیدگاه تجربی را بر نمی‌تابد. این مسئله هنگامی بیشتر مشهود است که با توجه به این که نیاز مالی برای پژوهش‌های صنعتی و دانشگاهی همواره از سوی صنعت تامین می‌شده است، پژوهش‌های انجام شده در جهت فعالیت‌های صرفاً تجربی جهت‌گیری کرده‌اند.

پیشرفت‌های در زمینه دانش پلیمر نیز نخست به طور تجربی و با درک ناقصی از رابطه بین ساختار شیمیایی و خواص آنها شکل گرفت. به تدریج با گسترش جنبه‌های مختلف دانش فیزیک و شیمی، روند نگرش‌های نظری در تجزیه و تحلیل خواص و عملکرد مواد پلیمری نیز توسعه یافت. ارائه نظریه مولکولی توسط



شکل ۲- نمودار نسبی درصد پژوهش‌های نظری در دانشگاه‌های صنعتی امیرکبیر و تربیت مدرس.

کشور در راستای غیرنظری، علل نیاز به تقویت این دیدگاه در تقابل با روش‌های صرفاً تجربی و تکامل آنها، آشنایی با ابزارها و روش‌های تجزیه و تحلیل نظری و پیشنهادهایی برای ترغیب دانش‌آموختگان رشته‌های پلیمری در انجام پژوهش‌های نظری است.

بررسی آماری پایان‌نامه‌های مربوط به دانشکده‌های مهندسی پلیمر در کشور جهت گیری زیر را نشان می‌دهد:

- پایان‌نامه‌های مربوط به فراورش محصولات پلیمری شامل مواد لاستیک، پلاستیک، کامپوزیت‌ها و پوشش‌ها،
- پایان‌نامه‌های مرتبط با روش‌های سنتز پلیمرها و
- پایان‌نامه‌های مرتبط با کاربرد مواد پلیمری در سایر رشته‌های علوم و مهندسی.

در گروه اول موضوع پژوهش شامل بهبود خواص کاربردی محصولات پلیمری با استفاده از ترکیب مواد مختلف، بررسی نقش عوامل افزوده شده، بررسی ماکروسکوپی بهبود خواص و اعتبارسنجی نتایج تجربی است. در گروه دوم پژوهش‌ها، سنتز یک ماده پلیمری از مواد اولیه، تاکید بر روش تولید، بررسی ساز و کارهای سینتیکی و شناسایی و اعتبارسنجی روش‌ها مطالعه شده است. این مرحله می‌تواند با فرایند مدل‌سازی واکنش‌های تولید و پیش‌بینی مشخصات مولکولی در مقیاس نیمه‌صنعتی به طور نظری ادامه یابد.

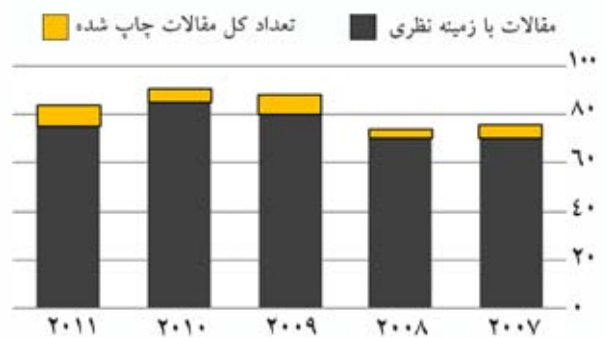
در گروه سوم نیز اهمیت موضوع بر استفاده از ترکیبات پلیمری برای کاربردهای ویژه مانند رهایش دارو یا زیست‌ماده است. در این گروه نیز تجزیه و تحلیل نظری شامل پیش‌بینی رفتار خاص و عملکرد پلیمر با توجه به کاربرد مطرح شده می‌تواند به کار گرفته شود. این تقسیم‌بندی بسیار کلی است و مسلم است که می‌توان مواردی را خارج از این سه حالت قرار داد. موارد یاد شده نشان می‌دهند که در تدوین و انجام پژوهش‌های پلیمری گرایش و تاکید

می‌پذیرد. شکل ۱ توزیع تعداد مقالات پژوهشی چاپ شده با ساختار نظری شامل مدل‌سازی، مشابه سازی، مطالعات سینتیکی، کنترل و... در مجله Iranian Polymer Journal در یک بازه زمانی ۵ ساله، ۲۰۰۸-۲۰۱۱، را نسبت به تعداد کل مقالات نشان می‌دهد و همان‌طور که مشخص است سهم بخش نظری بسیار اندک است [۸].

در پژوهش‌های دانشگاهی مانند پایان‌نامه‌های کارشناسی ارشد و دکتری و طرح‌های پژوهشی نیز وضع کمی مشابه است. شکل ۲ نمودار توزیع درصد پژوهش‌های با ساختار نظری را در دانشکده مهندسی پلیمر دانشگاه صنعتی امیرکبیر و گروه مهندسی پلیمر دانشگاه تربیت مدرس نشان می‌دهد. این آمار دقیق نیست و به‌طور نسبی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این نسبت برای پژوهش‌های دانشگاهی و طرح‌های پژوهشی چندان زیاد نیست [۹]. این روال تا اندازه‌ای در بسیاری از زمینه‌های آکادمیک مربوط به علوم پلیمری مشاهده می‌شود.

بسیاری از دانش‌آموختگان رشته‌های مختلف پلیمری به صراحت تمایل به انجام فعالیت‌های پژوهشی در زمینه‌های تجربی شامل سنتز مواد پلیمری و فراورش نهایی آنها دارند. احساس نیاز صنعت به آموزش‌های تجربی و صرفاً کاربردی و عدم اهمیت ارتقای کیفیت محصولات از عوامل تشدید کننده این گرایش هستند. صرف نظر از موارد بسیار جزئی به طور قاطع می‌توان گفت که امکان قانع کردن صنعت برای انجام پژوهش‌های نظری در زمینه‌های مختلف از جمله ارتقای فرایند، پیش‌بینی خواص، کنترل و جایگزینی محصولات تقریباً صفر است و پژوهش‌های با زمینه نظری انجام شده صرفاً به دلیل علاقه شخصی پژوهشگر یا با هدف انتشار نتایج در مجلات بین‌المللی بوده است.

در این پژوهش، هدف تشریح علل گرایش پژوهش‌های جاری در



شکل ۱- نمودار تعداد مقالات پژوهشی چاپ شده در مجله IPJ با تفکیک ساختار نظری و غیرنظری.

اصلی بر جنبه‌های تجربی، آزمایشگاهی، فعالیت دستگاهی و به دست آوردن نتایج ملموس در زمان بسیار کوتاه است.

دلایل گرایش به انجام پژوهش‌ها در زمینه‌های تجربی

به طور کلی دلایل گرایش به انجام پژوهش‌ها در زمینه‌های تجربی را می‌توان در سه گروه از عوامل جست و جو کرد:

- دلایل ذاتی و بنیادی مرتبط با دانش پلیمر،
- دلایل مربوط به مهارت‌های شغلی و کاربرد صنعتی و
- جنبه‌های آموزشی مهندسی پلیمر.

دلایل ذاتی و بنیادی مرتبط با دانش پلیمر

مطالعه مواد پلیمری نشان می‌دهد، این مواد تفاوت‌های بارزی با مواد ساده از نقطه نظر خواص میکروسکوپی و مولکولی و خواص ماکروسکوپی دارند، به نحوی که تقسیم‌بندی متداول در باره آنها صدق نمی‌کند. رفتار این مواد از قوانین فیزیکی تعریف شده برای مواد ساده نیز انحراف دارد و حتی رفتار پیچیده‌ای نشان می‌دهند. مهم‌ترین عوامل تفاوت مواد پلیمری را می‌توان به شکل زیر بیان داشت [۱-۳]:

- ساختار مولکولی مواد پلیمری به شکل زنجیرهای بلند همراه با شاخه‌های بلند عرضی و حتی به شکل ساختار ژل و شبکه‌ای سه‌بعدی است که خواص ویژه‌ای مانند انتقال فازی و حالت‌های فیزیکی چندفازی را ایجاد می‌کند.

- فرایندهای تولید و فراورش مواد پلیمری پیچیده‌اند. روابط خواص فیزیکی و شیمیایی، ترمودینامیکی و سینتیکی مربوط به مرحله تولید و آثار غیرخطی در مرحله فرایند تولید مشاهده می‌شود [۳].

- قابلیت کاربرد مواد پلیمری در یک دامنه نسبتاً طولانی از شرایط محیطی عملکرد، حفظ خواص یا حتی بروز خواص متضاد در شرایط متغیر.

- تنوع گسترده مونومرها و مخلوط آنها در فرایند تولید، اختلاط مواد مختلف پلیمری ضمن فراهم کردن حالت‌های متعدد محصول، مشکل در عدم دقت در پیش‌بینی خواص محصول ترکیبی را نیز به همراه دارد.

- معادلات رفتاری مبین روابط و قوانین فیزیکی برای توجیه رفتار مواد پلیمری غیرخطی است و نیاز به روش‌های مناسب ریاضی برای حل صحیح و معتبر آنهاست.

- وجود واکنش‌های متعدد در مرحله تولید، بروز آثار و پدیده‌های کنترل‌کننده به وسیله نفوذ، وابستگی ثابت‌های سرعت به خواص فیزیکی و رئولوژیکی و نیاز به معادلات حالت پیچیده برای بررسی رفتار متغیرهای موجود [۴، ۵].

- در مرحله فراورش اختلاط ترکیبات پلیمری، مواد افزودنی، وضعیت امتزاج پذیری و جدایی فازی، رفتار دینامیکی و تعادلی شکل‌شناسی و آثار برهم‌کنش اجزای مختلف با یکدیگر نیازمند نگرش‌های نظری مناسب است [۵].

- در فرایندهای تهیه محصولات نهایی پلیمری مانند تزریق، قالب‌گیری، ریسندگی، ریختگی و پخت در دما و فشار زیاد، تولید گرمای ناشی از تنش‌ها و در نظر گرفتن آنها عدم قطعیت در پیش‌بینی خواص نهایی کاربردی اعمال می‌کند.

- نیاز به مدل‌ها و قوانین نه چندان ساده برای پیش‌بینی رفتار فیزیکی، مکانیکی و گرمایی ترکیبات پلیمری به عنوان محصول نهایی و کافی بودن مدل‌های مربوط به مواد کلاسیک برای ترکیبات پلیمری [۱۰، ۶، ۵].

- قرار گرفتن مواد پلیمری در وضعیت کاربرد نهایی در زمان طولانی و تحت شرایط ویژه دمایی و فشاری، تابش‌های متنوع و اتمسفرهای گوناگون و شرایط منحصر به فرد خدمات دهی.

- مجموعه عوامل یاد شده نشان می‌دهد، در تبیین کاربرد و پیش‌بینی رفتار عملکرد ترکیبات پلیمری تفاوت‌های بنیادی و اساسی با مواد ساده با خواص فیزیکی و مکانیکی ثابت وجود دارد.

دلایل مربوط به مهارت‌های شغلی و کاربرد صنعتی

توزیع صنایع مرتبط با محصولات پلیمری در کشور بر دو محور کلی قطعه‌سازی و تولید پلیمر معطوف است. منظور از قطعه‌سازی فرایندهایی است که در آنها یک یا چند ترکیب پلیمری به همراه مواد افزودنی دیگر در دستگاه‌های خاص فراورش و محصولی با خاصیت مشخص و کاربرد ویژه تولید می‌شود. ساخت انواع قطعات پلاستیک، لاستیک، کامپوزیت، الیاف، و پوشش‌ها در این مقوله قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین ویژگی‌های این زمینه و علل گرایش دانش‌آموختگان به انجام پژوهش‌های عملی در این حوزه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- سهولت درک نسبی و کاربردی فرایند و کسب سریع تجربه عملی آزمایشگاهی یا کارگاهی.

- محدود بودن انواع دستگاه‌های مورد استفاده و آشنایی سریع با آنها.

- فراهم کردن سریع نیازها و خواسته‌های ملموس مشتری.

- قابلیت جای‌گزینی مواد جدید مشابه خارجی و ارائه

پلیمر چندان جذاب نیست.

محصولات صنعتی.

در واحدهای صنعتی پایین‌دستی نیز نگرش بیشتر مبنای تجربی دارد و تغییرات و تحولات فرایندی چندان با دید نظری و پیش‌بینی خواص فرایندی و دینامیکی انجام نمی‌گیرد و صرفاً بر مبنای مجموعه‌ای از دستورکارهای تثبیت شده انجام می‌پذیرد. بدین ترتیب این زمینه نیز چندان جذابیتی برای انجام پژوهش‌های نظری یا مدل‌سازی ایجاد نمی‌کند. برای یک دانش‌آموخته مهندسی پلیمر که به انجام پژوهش در زمینه‌های نظری یا مدل‌سازی علاقه دارد، فرصت شغلی بالقوه و مناسبی ایجاد نمی‌شود.

جنبه‌های آموزشی مهندسی پلیمر

از عوامل موثر در عدم گرایش به نگرش‌های نظری و مدل‌سازی، جنبه‌های آموزشی و تجربه‌های شخصی دانش‌آموخته رشته پلیمر در دوران تحصیل است. از نقطه نظر آموزشی، ایجاد و ترغیب گرایش به انجام پژوهش‌های نظری مرتبط با مدل‌سازی یا مشابه‌سازی فرایندهای مربوط به علوم و مهندسی پلیمر نیازمند کسب مهارت در زمینه‌های دانش و روش‌های ریاضی، دانش کامپیوتری و نرم‌افزاری و ایجاد تمایل به این زمینه در صنعت کشور است.

- آموزش روش‌های ریاضی با نگرش کاربردی در مهندسی پلیمر تا حد زیادی ضعیف است و در سطح آموزش رشته مهندسی شیمی نیست و محدود به دروس ریاضی در سطح عمومی رشته‌های مهندسی است (هر چند در مهندسی شیمی نیز در سطوح بالای مدل‌سازی نیاز به آموزش روش‌های ریاضی پیش‌رفته حس می‌شود). افزون بر این آموزش‌های ریاضی ارائه شده عمدتاً به شکل روش‌های ریاضیات کاربردی است و اغلب در مواقعی مطرح می‌شوند که دانشجو هنوز نیاز به آنها را درک نکرده و ترغیب به استفاده از آنها هنوز ایجاد نشده است.

باید به این نکته توجه داشت، نظر به غلبه دیدگاه تجربی، روابط حاکم بر فرایندهای فیزیکی اغلب به شکل نسبتاً ساده ارائه می‌شوند و حل آنها نیازمند روش‌های پیچیده ریاضی نیست. بنابراین، در کنار جنبه بسیار قوی نگرش تجربی در اغلب مفاهیم مربوط به فرایندهای علوم و مهندسی پلیمر، در تجزیه و تحلیل روابط ریاضی و فیزیکی نیازی به سطح بالای دانش ریاضیات نیست و روش‌های ریاضی آموزش داده شده طی دوران تحصیل کافی و مناسب به نظر می‌رسد. لازم به ذکر است، تجزیه و تحلیل‌های نظری و مدل‌سازی پیش‌رفته فرایندهای پلیمری، که در اغلب موارد از فرایندهای جاری در مهندسی شیمی به مراتب پیچیده‌تر است، نیازمند روش‌های قدرتمند ریاضی و روش‌های

- تنوع گسترده واحدهای کارگاهی کوچک تولید محصول.
- توان جذب نیروی متخصص و فراهم بودن زمینه فعالیت برای دانش‌آموختگان.

- در دسترس بودن دستگاه‌های مورد نیاز با تنوع گسترده.
- نیاز به سرمایه‌گذاری نه چندان حجیم و داشتن توجیه اقتصادی.
- موارد یاد شده به خوبی جذابیت انجام پژوهش در زمینه‌های تولید محصولات پلیمری را نشان می‌دهد، به نحوی که حتی نیروهای بدون آموزش دانشگاهی، ولی با کسب تخصص مورد نیاز به راحتی می‌توانند در این زمینه به فعالیت‌های تجربی بپردازند. در نقطه نظر مقابل، مدل‌سازی و مشابه‌سازی این فرایندها صرفاً از دیدگاه نظری با وجود قابلیت کاربردی زیاد آنها چندان مورد توجه و علاقه صاحبان صنایع نیست و صرف‌نظر از موارد خاص یا موارد مربوط به صنایع نسبتاً بزرگ، چندان قابلیت جذب نیروی متخصص دانشگاهی را در جهت انجام این گونه فعالیت‌ها وجود ندارد.

در بخش تولید پلیمر یا فرایندهای پلیمر شدن، فرایند شامل تهیه محصول پلیمری از مواد اولیه یا مواد مونومری است. در این حوزه فرایند تولید عمدتاً به شکل تولید در مقیاس مجتمع‌های پتروشیمیایی بخش دولتی و نیز گسترش واحدهای پایین‌دستی در مقیاس کوچک و نیمه صنعتی است. بر خلاف موارد جذاب بخش فرایندهای ساخت قطعه، دلایل زیر در کاهش جذابیت این بخش نقش عمده‌ای ایفا می‌کنند:

- نیاز به کسب قابلیت ریاضی و رایانه‌ای نسبتاً مناسب.
- توانایی و قابلیت رقابت مهندسان شیمی با حفظ برتری نسبی.
- نیاز به کسب دانش تخصصی در زمینه‌های غیرپلیمری و نیاز به تخصص سایر رشته‌های مهندسی.
- نیاز به فراهم آوردن اطلاعات مربوط به ساخت و عملکرد دستگاه‌های مرتبط.
- نیاز به سرمایه‌گذاری نسبتاً هنگفت برای توجیه‌پذیری اقتصادی.
- ریسک‌پذیری در مرحله تولید به علت ظرفیت‌های زیاد و تکرارناپذیری در شرایط عملکردی یکسان.

در این زمینه ظرفیت در بخش دولتی در مقیاس بزرگ و به شکل مجتمع‌های پتروشیمیایی با فرایندهایی مبتنی بر دانش فنی خارجی است. این امر سبب می‌شود تا این بخش فضای چندان مناسبی برای مانور و تغییرات فرایندی و پژوهش‌های نظری، مدل‌سازی یا مشابه‌سازی نبوده و اعتبارسنجی آنها امکان‌پذیر نباشد. افزون بر این در این گونه واحدهای صنعتی مسئله مهم کنترل فرایند و نظارت بر صحت عملکرد است که صرفاً از دیدگاه یک مهندس

حل معادلات حاکم است.

- آموزش روش‌های استفاده از رایانه و برنامه‌نویسی و آشنایی با نرم‌افزارهای مرتبط با علوم و مهندسی پلیمر نقش ویژه‌ای در ترغیب و تغییر دیدگاه دانش‌آموختگان در ارتباط با انجام پژوهش‌های نظری ایفا می‌کند. در این راستا باید ضمن آموزش اصول کلی برنامه‌نویسی در سطوح ابتدایی و متوسط، آشنایی با نرم‌افزارهای مناسب و قابلیت آنها برای تجزیه و تحلیل فرایندهای پلیمری به طور جدی در دستور کار قرار گیرد.

به اذعان اغلب پژوهشگران در زمینه‌های نظری، مدل‌سازی و مشابه‌سازی فرایندهای پلیمری، توانایی‌های لازم برای برنامه‌نویسی و استفاده مناسب از نرم‌افزارهای مهندسی بر مبنای نیاز شخصی و با صرف زمان و هزینه نسبتاً زیاد میسر می‌شود. در حالی که این آموزش‌ها باید طی دوران تحصیل و در دانشگاه‌ها فراهم شود. تغییر در روش‌های آموزش با جهت‌گیری استفاده روزافزون از توانمندی‌های رایانه‌ای و برگزاری کارگاه‌های آموزش استفاده از نرم‌افزارهای مرتبط می‌تواند اقدام موثری در این زمینه باشد.

- تغییر نگرش و ایجاد علاقه در جهت انجام فعالیت‌های نظری و مدل‌سازی برای دانش‌آموختگان رشته‌های پلیمری باید از زمان تحصیل و از درون دانشکده‌ها آغاز شود. ترغیب دانش‌آموختگان با برجسته کردن اهمیت مطالعات نظری و انجام پژوهش‌های مدل‌سازی در فرایندها و در مقیاس صنعتی، بیان تجربیات شخصی استادان و متخصصان صنعتی مرتبط با دانشگاه و ایجاد ارتباط قدرتمند و دو طرفه با صنعت است.

تجربیات اشخاص آموزش دهنده و نحوه برخورد آنها با مقوله‌های نظری در ترغیب دانشجویان به انجام پژوهش‌های مدل‌سازی می‌تواند به نحو موثری در تهییج علاقه دانشجویان به سمت این گرایش مفید باشد. همان گونه که تا به حال در جنبه‌های تجربی و کارگاهی بسیار موثر بوده و باعث رشد فناوری‌ها و فرایندهای پلیمری در مقیاس گسترده در سطح کشور شده است.

زمینه‌های پژوهش‌های نظری در علوم و مهندسی پلیمر

پدیده‌ها و فرایندهای مرتبط با علوم و مهندسی پلیمر می‌تواند در یک یا چند زمینه زیر با در نظر گرفتن اهداف خاص مورد نظر پژوهش مورد مطالعه قرار گیرد:

- نگرش مولکولی یا میکروسکوپی: در این حالت رفتار مولکولی زنجیرهای منفرد یا مجتمع پلیمری و برهم کنش آنها با یکدیگر یا

با سایر اجزای موجود در سامانه تحت شرایط متنوع فیزیکی و هندسی بررسی و خواص ماکروسکوپی و رفتار ترکیبات پلیمری بر مبنای آنها مشابه‌سازی می‌شود. بسیاری از خواص پیچیده ترکیبات پلیمری، نانوکامپوزیت‌ها، پوشش‌ها و الیاف حداقل به طور کیفی قابل بررسی و تجزیه و تحلیل است.

روش‌ها و محاسبات ریاضی در این زمینه وابسته به توانمندی‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری در دسترس است. نقطه ضعف نگرش مزبور این است که تعمیم نتایج مشابه‌سازی در این روش به سطح ماکروسکوپی باید با احتیاط انجام شود. از نقاط منفی دیگر این روش، در دسترس نبودن قوانین و روابط فیزیکی مناسب برای بررسی خواص زنجیرهای پلیمری است.

- نگرش مهندسی واکنش‌های پلیمر شدن: در این زمینه با هدف تهیه پلیمر با درصد تبدیل، وزن مولکولی و ساختار میکروسکوپی زنجیرهای پلیمری مشخص عوامل و متغیرهای موثر بر فرایند تولید در مقیاس آزمایشگاهی و ثابت‌های سینتیکی مشخص می‌شوند. این زمینه فعالیت یکی از شاخص‌های بارز تفاوت مهندسی پلیمر با مهندسی واکنش‌های معمولی در مهندسی شیمی است. می‌توان به جرات اظهار داشت، بیشترین پیش‌رفت‌های نظری و ریاضی در زمینه مهندسی واکنش‌های مربوط به انواع روش‌های پلیمر شدن بوده است. -نگرش طراحی و کنترل فرایند: این زمینه فعالیت مربوط به تولید محصولات پلیمری از مواد اولیه در یک راکتور با مقیاس صنعتی و کنترل برای اطمینان از رسیدن به مشخصات مورد نظر است.

این حوزه بیشتر زمینه فعالیت مهندسان شیمی با جهت‌گیری استفاده از اطلاعات مهندسی پلیمر در زمینه فرایند پلیمر شدن و مشخصات پدیده‌های انتقال جرم، گرما و اندازه حرکت مربوط به حوزه عملکرد مواد پلیمری است. در واقع، در این زمینه اطلاعات پلیمری صرفاً به عنوان یک مجموعه خاص ورودی به یک مدول ورودی در نظر گرفته شد و ویژگی‌های طراحی و کنترل عملکرد فرایند بر مبنای اهداف معین شده ارائه می‌شود.

-نگرش مدل‌سازی فرایندهای فراورش محصولات پلیمری: در این زمینه هدف از مطالعه پیش‌بینی رفتار عملکرد محصولات پلیمری در فرایندهای شکل‌دهی نهایی مانند فرایندهای تزریق و قالب‌گیری، شرایط پخت و بهبود عملکرد دستگاه‌ها بر مبنای اطلاعات اولیه و رسیدن به شرایط بهینه تولید محصول است.

این حوزه متکی بر معادلات بقا و روابط ماکروسکوپی ارتباط دهنده شرایط و متغیرهای عملیاتی با خواص محصول است.

دیدگاه‌های تحلیل ریاضی فرایندهای مهندسی

در تجزیه و تحلیل ریاضی و نظری فرایندهای مربوط به علوم و مهندسی پلیمر، هدف به دست آوردن یک رابطه یا الگوریتم ریاضی برای ارتباط بین متغیرها و پارامترهای ورودی یا تعیین کننده و پارامترها و متغیرهای خروجی به نحوی است که بتوان با دانستن عوامل تعیین کننده ورودی، ویژگی‌های مرحله انتهای فرایند را پیش بینی یا تخمین زد. در یک تقسیم بندی می توان دیدگاه‌های رایج در تحلیل ریاضی را به دو گروه تقسیم بندی کرد [۱۰-۱۲].

روش‌های جبرگرایانه یا قطعیت گرایانه

روش‌های جبرگرایانه یا قطعیت گرایانه روش‌های کاملاً ریاضی است که بر مبنای اعمال معادلات اساسی بقای جرم، انرژی، و اندازه حرکت استفاده می‌شود. در یک هندسه با مرزهای مشخص از سامانه مورد مطالعه، متغیرهای مد نظر اساسی جرم (غلظت)، دما و میدان سرعت بررسی می‌شود. در اغلب موارد نیاز به استفاده از قوانین ویژه‌ای است که در آنها متغیرهای میدانی به کمیت‌های دیگر مرتبط می‌شوند. قوانین ویژه مانند قانون هدایت گرمای فوریه یا قانون گرانش نیوتن در شرایط خاص قابلیت کاربرد و اعمال دارد. عملیات ریاضی روی معادلات اساسی بقا و معادلات کمکی منجر به معادلات جبری یا معادلات دیفرانسیل می‌شود که به طور کلی مبین تغییرات و ارتباط متغیرهای اصلی و اساسی سامانه بررسی شده با متغیرهای مکانی و زمانی است. این گونه روش‌های ریاضی نظری را مدل‌سازی ریاضی نیز می‌نامند که به معنای مدل کردن یا به الگو درآوردن رفتار فرایند است. مشخصه بسیار مهم تجزیه و تحلیل جبرگرایانه، قطعیت، دقت و جامعیت و منطقی بودن آن است. اعتبار و صحت یک مدل‌سازی ریاضی به نزدیک بودن نتایج و مشاهدات و کم بودن مقدار خطاست که به معنی فاصله بین نتایج نظری و واقعی است. یک مدل‌سازی ریاضی به علت روند ساده سازی چندجانبه از یک مسئله واقعی و فیزیکی و تقلیل آن به یک سامانه قابل تجزیه و تحلیل با روش‌های ریاضی همواره نسبت به نتایج واقعی انحراف دارد. در اغلب موارد برای حل معادلات اساسی به دست آمده در تحلیل نظری یا مدل‌سازی از روش‌های مناسب عددی استفاده می‌شود [۱۰-۱۲].

انواع روش‌های جبرگرایانه را می‌توان دسته‌بندی کرد که در پی می‌آید.

نگرش توده‌ای

در این نگرش رابطه تغییرات یک متغیر با زمان و پیش‌بینی رفتار

زمانی آن مد نظر است. در این حالت تغییرات در بیرون فضای داخلی سامانه محاسبه می‌شود.

نگرش انتگرالی

این نگرش تا حدود زیادی شبیه روش ریاضی توده‌ای است که در آن تغییرات متغیر یا پارامترها با مکان به شکل انتگرالی حذف می‌شود. در واقع، ابتدا تابعیت متغیرهای اصلی سامانه با مکان تعیین و بر حذف آثار مکانی نسبت به این متغیرها در فضای سامانه انتگرال گرفته می‌شود. این دو نوع نگرش برای پیش‌بینی و بررسی رفتار ماکروسکوپی فرایند با زمان انجام می‌پذیرد.

نگرش دیفرانسیلی

در این نوع مدل‌سازی، متغیرهای اصلی سامانه به شکل توزیع یافته یا تابع مختصات فضایی و زمانی خواهد بود. در این نوع مدل‌سازی، نتیجه به شکل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای خواهد بود که حل آنها منجر به تعیین و پیش‌بینی مقدار متغیر در نقاط مختلف فضا و در هر زمان خواهد بود. دو نوع تحلیل یا دیدگاه اولری و لاگراژی از نقطه نظر حرکت محورهای مختصات مکانی در این روش استفاده می‌شود.

نگرش موازنه کلان

این نوع نگرش اغلب برای بررسی کلان فرایندهای شیمیایی و پلیمری و برای موازنه‌های جرم و انرژی در کل فرایند، برای بخش‌های مجزای فرایند و ملاحظات اقتصادی به کار می‌رود.

نگرش هامیلتونی انرژی

در نگرش هامیلتونی برای بررسی و تجزیه و تحلیل سامانه‌های پلیمری از یک تابع یا هامیلتونی انرژی استفاده می‌شود. برای این منظور یک تابع پتانسیل یا تابع انرژی جنبشی برای یک سامانه متشکل از اجزای منفرد در نظر گرفته شده و حداقل مقدار انرژی برای کل سامانه معین می‌شود. به طور طبیعی، هر چه اجزای موجود در سامانه زیادتر یا هر چه برهم‌کنش اجزا یا فرایند اعمال شده روی سامانه پیچیده باشد، به یک تابع هامیلتونی انرژی پیچیده نیاز است که امکان دارد انجام محاسبات و اعمال ریاضی روی آن چندان آسان نباشد.

روش دینامیک مولکولی

در این روش برای تشریح رفتار یک فرایند باید نگاه مولکولی داشت. بدین معنی که تغییر حالت و وضعیت و انرژی سامانه را به حرکت و سرعت مولکول‌ها، اتم‌ها و الکترون‌ها و تبادل انرژی آنها با یکدیگر و با عوامل موثر خارجی مربوط و با حداقل کردن انرژی

حالت پایدار سامانه معین می‌شود.

روش‌های تصادفی

روش‌های تصادفی دامنه وسیعی از تجزیه و تحلیل‌های شبه ریاضی برای تشریح رفتار یک سامانه را تشکیل می‌دهد. اساس روش‌های تصادفی بر این فرض یا منطق استوار است که رفتار فیزیکی و واقعی یک فرایند را می‌توان با یک رخداد یا یک مجموعه رخدادهای تصادفی بیان کرد که به وسیله یک رابطه یا الگوریتم ریاضی ارائه می‌شود که خود بر مبنای دیدگاه‌های ترمودینامیکی و مکانیک آماری واقع شده است. در این نوع نگرش، برای فرایند یک یا چند مرحله فرض می‌شود و شانس بروز یا رخداد یک اتفاق یا یک حالت با مقایسه با یک عدد تصادفی معین می‌شود. بدین معنی که اگر عدد تصادفی در یک دامنه مشخص باشد، یک رویداد مشخص رخ می‌دهد. در حالتی که میزان تکرار این رخداد بسیار زیاد باشد، مقدار متوسط آن در طول یک زمان مشخص معیاری از رفتار واقعی سامانه فیزیکی خواهد بود. روش‌های تصادفی در مقایسه با روش‌های جبرگرایانه بسیار ساده‌تراند و نیازی به روابط و قوانین ریاضی و فیزیکی ندارند. این روش‌ها بر منطق بسیار ساده و ابتدایی استوارند. بدیهی است، هر چه فرایند پیچیده‌تر و جزئیات بیشتر با دقت بالاتری را نیاز داشته باشد، الگوریتم مورد نیاز برای تشریح یک فرایند پیچیده‌تر خواهد بود. افزون بر این، یک مزیت مهم استفاده از روش‌های تصادفی، تبیین فرایند بر مبنای فرض‌ها و حالات غیرواقعی است. بدین معنی که حتی در حالات غیرواقعی نیز با سناریوی ارائه شده می‌توان رفتار سامانه را پیش بینی کرد.

یک ماده پلیمری مجموعه‌ای از تعداد بسیار زیاد زنجیرهای بلند مولکولی است. این زنجیرها بنا بر ماهیت خود ساختار تصادفی دارند. بدین معنی که در درون ساختار یک زنجیر پلیمری، نحوه استقرار و آرایش مواد ترکیب دهنده تصادفی است. رفتار یک مجموعه زنجیرهای پلیمری نیز در شرایط مختلف فیزیکی و مکانیکی مجموع رفتارهای زنجیرهای منفرد تصادفی است. این شواهد ماهیت تصادفی فرایندهای مرتبط با مواد پلیمری را معین می‌کند و در نتیجه قابلیت استفاده از دیدگاه‌های تصادفی را در تجزیه و تحلیل فرایندهای پلیمری دارد.

دیدگاه تصادفی در تجزیه و تحلیل فرایندها نگرشی جدید و مربوط به دهه‌های اخیر است. نخستین کاربرد علمی آن به پژوهش‌های متروپولیس و همکاران در خلال جنگ جهانی دوم مربوط می‌شود. با گسترش صنایع کامپیوتری و افزایش توان و ظرفیت‌های محاسباتی، نگرش تصادفی نیز رشد بسیار روز افزونی

داشته است. با این وجود هنوز هم رسیدن به نتایج بسیار نزدیک به واقعیت برای سامانه‌ها و فرایندهای فیزیکی، مستلزم داشتن فضای محاسباتی کامپیوتری حجیم و انجام آزمایش‌های کامپیوتری متعدد است. همین امر گاهی باعث علاقه کمتر به این نوع نگرش و کاهش سطح مشابه سازی تا اندازه‌ها و ظرفیت‌های قابل دسترس می‌شود [۱۵-۱۳].

از مهم‌ترین روش‌ها و ابزار ریاضی تصادفی می‌توان از روش‌های مونت کارلو، زنجیر مارکوف، زهش (percolation)، فراکتال‌ها و پدیده آشفتگی (chaos) نام برد که در علوم پلیمری کاربرد یافته‌اند. روش‌های تصادفی جذابیت زیادی دارند و از تنوع بسیار گسترده و کاربردهای متعددی برخوردارند و هر روز انواع جدیدی ابداع و ارائه می‌شود. در واقع، فعالیت پژوهشی در این زمینه علاوه بر استفاده از جنبه‌های ریاضی نیز نیازمند بهره‌مندی از سطح مناسبی از خلاقیت است.

پیشنهادها، نگاه راهبردی به آینده

مراکز دانشگاهی آموزش علوم و مهندسی پلیمر در توسعه و نشر علوم و دانش‌های پلیمری و گسترش نیازهای فنی، صنعتی و فناوری کشور سهمی بسزا و نقش ویژه‌ای دارند. علاوه بر این، وظیفه خطیری در تعریف و تدوین و تولید دانش فنی و فناوری فرایندهای پلیمری از لحاظ خودکفایی و استقلال و نیل به اهداف کلان کشور دارند.

رشد تعداد متقاضیان تحصیل در دوره‌های کارشناسی ارشد و دکتری به معنای تنوع در تعریف موضوعات پژوهشی و کشف زمینه‌های نوین و فناورانه در زمینه‌های پلیمری است که قبل از این مورد توجه نبوده یا فعالیت در حوزه آنها با محدودیت‌هایی رو به رو بوده است. تعداد زیاد داوطلب به معنای دسترسی به نیروی انسانی به مقدار مناسب و زیاد است و زمینه‌های چالش برانگیزی را می‌طلبد یا تعریف می‌کند. فعالیت در این زمینه‌ها نیازمند در اختیار داشتن ساختارها و ابزارهای مناسب است.

از نقطه نظر علوم و مهندسی پلیمر زمینه‌های اصلی و رو به رشد فعالیت‌های پژوهشی با اهداف فناوری منطقه‌ای و ملی را می‌توان به شکل زیر دسته‌بندی کرد:

- مدل‌سازی و مشابه‌سازی فرایندهای پلیمر شدن در جهت تشریح فرایندهای تولید محصولات پلیمری در کشور، بهبود کیفیت، خواص و مشخصات محصولات، کاهش هزینه‌ها و انرژی، امکان

فرایندهای مربوط به موارد جزئی علوم، صنایع و فرایندهای پلیمری. - ایجاد زیرساخت‌های محاسباتی از نقطه نظر فراهم کردن تسهیلات کامپیوتری در بعد سخت افزاری و در دسترس بودن و فراهم کردن تجهیزات کامپیوتری و آموزشی در سطوح شخصی و مجموعه ابرکامپیوترها.

- تهیه، آموزش و تدوین نرم افزارهای محاسبات مهندسی در جهت تجزیه و تحلیل نتایج مطالعات مدل‌سازی و مشابه‌سازی فرایندهای مهندسی پلیمری و به طور خاص آموزش و استفاده از نرم‌افزارهای محاسباتی مهندسی و نرم‌افزارهای ویژه حل معادلات دیفرانسیل فرایندهای پلیمری، آموزش زبان‌های برنامه‌نویسی قوی و پیشرفته و برگزاری دوره‌های آموزشی پیشرفته مناسب برای دانش‌آموختگان دوره‌های کارشناسی ارشد و دکتری حرفه‌ای و حتی برای اعضای هیئت علمی در راستای ارتقای توان کدنگاری در سطوح شخصی و بومی.

- ایجاد ارتباط با صنایع مختلف پلیمر و پتروشیمی (مرتبط با فرایندهای تولید مواد پلیمری) در جهت ترغیب صنعت به سمت تشریح نظری فرایندهای مهندسی تولید و استفاده از نتایج آن برای سهولت در حل مشکلات میدانی و ایجاد انعطاف‌پذیری در ارائه محصولات متنوع و جایگزین با در نظر گرفتن ملاحظات انرژی و هزینه.

- تدوین و ارائه بسته‌های نرم‌افزاری به صنایع مختلف پلیمری با نگاه راهبردی در جهت کنترل فرایند، مدیریت راه‌اندازی و توقف فرایند و مدیریت شرایط بحرانی، تغییر شرایط عملیات تولید، کنترل کیفیت، ردیابی خطوط و جریان‌ها و تعویض دستگاه‌ها و تجهیزات و ارتقای کیفیت.

قدردانی

بخشی از هزینه‌های انجام این پژوهش توسط پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران پشتیبانی شده است.

مراجع

1. Rudin A., *Elements of Polymer Science and Engineering*, Academic, London, 1-23, 1998.
2. Sperling H., *Introduction to Physical Polymer Science*, John Wiley, New York, 3-12, 2006.
3. محمدی ناصر، شیمی و فیزیک پلیمرها، انتشارات دانشگاه

جایگزینی با محصولات جدید و استفاده چندگانه از واحدهای موجود و تولید انواع مختلف محصولات پلیمری، کنترل فرایند و نظارت. در این وضعیت نگرش‌های واحدهای تولیدی محلی با ظرفیت کم و واحدهای با ظرفیت‌های صنعتی را می‌توان در نظر داشت.

- مدل‌سازی و مشابه‌سازی فرایندهای فرآورش محصولات پلیمری و به طور مشخص انواع فرایندهای تزریق، قالب‌گیری، اکستروژن، گرماشکل‌دهی و سایر فرایندها. در این حالت زمینه‌های بالقوه در تشریح نظری استفاده از ترکیبات متنوع پلیمری شامل ترکیبات لاستیکی، پلاستیکی و انواع کامپوزیت‌ها، استفاده از دستگاه‌های موجود و تشریح عملکرد آنها و بهینه‌سازی روش‌های فرآورش با توجه به ملاحظات انرژی و هزینه‌ای و دست‌یابی به مواد مورد نیاز از بازار بین‌المللی می‌تواند بررسی شود.

- مسئله بسیار مهمی که در آینده نزدیک و حتی در حال حاضر تاثیر بسیار مهمی در جهت‌گیری برنامه‌ریزی‌های خرد و کلان کشور و حتی منطقه خواهد داشت، ملاحظات زیست‌محیطی در انواع فرایندهای مربوط به صنایع پلیمری است. در این راستا تشریح نظری فرایندهای موجود با نگرش کاهش و حذف آلودگی‌های زیست‌محیطی، حذف و جایگزینی مواد آلاینده با ترکیبات زیست‌سازگار و بررسی استفاده از تجهیزات و دستگاه‌های موجود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در این ارتباط ضمن سرمایه‌گذاری روی نیروی انسانی در جهت پرورش تخصص‌های لازم در زمینه‌های محاسباتی و نظری علوم و صنایع مهندسی پلیمر، باید سرمایه‌گذاری در جهت ایجاد ساختارهای مناسب و آموزش و ترویج آنها را در نظر داشت.

در این باره می‌توان موارد مشخص زیر را مطرح کرد:

- تدوین ساختارهای پژوهشی بر مبنای جهت‌گیری پروژه‌های دوره‌های کارشناسی ارشد و دکتری حرفه‌ای و پروژه‌های فناوری در راستای توسعه نگرش‌های مبتنی بر مدل‌سازی و مشابه‌سازی

صنعتی امیرکبیر، صفحات ۱-۲۳، ۱۳۸۷.

4. Billmayer F.W., *Textbook of Polymer Science*, Interscience, New York, 1-5, 1992.
5. Strobl G., *The Physics of Polymers*, Springer, Berlin, 2007.

6. Van der Vegt A.K., *From Polymer to Plastics*, Delft University, Netherlands, 2002.
7. Utracki LA., *Polymer Alloys and Blends*, Hanser, New York, 1999.
8. آمار برگرفته از آرشیو مجله IPJ.
9. واشقانی فراهانی ابراهیم، ضرورت تدوین برنامه راهبردی توسعه علوم و مهندسی پلیمر، دو ماهنامه انجمن پلیمر، شماره ۶۳، صفحه ۳-۲، ۱۳۹۱.
10. Stroud A.K. and Booth D.G., *Advanced Engineering Mathematics*, 4th ed., McMillan, New York, 1986.
11. Polyanin A.D. and Manzhirov A.V., *Handbook of Mathematics for Engineers and Scientists*, Taylor & Francis, New York, 2007.
12. Householder A.S., *Principles of Numerical Analysis*, McGraw-Hill, USA, 1994.
13. Maejima M. and Shiga T., *Stochastic Processes*, World Scientific, 2002.
14. Holden H., Øksendal B., Ubøe J., and Zhang T., *Stochastic Partial Differential Equations*, 2nd Ed., Springer, New York, 2000.
15. Kroese D.P., Taimre T., Botev Z.I., *Handbook of Monte Carlo Methods*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2011.