



دانشگاه پیام نور

شیمی تجزیه پیشرفته

(کارشناسی ارشد شیمی)

دکتر حسن کرمی دکتر محمدعلی کریمی

«امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.»^۱

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پربار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برآیمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاورد انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

۱. پیام مقام معظم رهبری به مناسبت آغاز هفته کتاب ۷۲/۱۰/۴

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشأن خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «اقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگاه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب

سیرده	پیشگفتار مؤلفین
۱	فصل اول: روش‌های تجزیه حرارتی
۱	هدف کلی
۱	هدف‌های یادگیری
۱	مقدمه
۲	۱-۱ دسته‌بندی روش‌های تجزیه حرارتی
۳	۲-۱ تجزیه وزن‌سنجی حرارتی
۴	۱-۲-۱ دستگاه‌وری TGA
۷	۲-۲-۱ متغیرهای کاری TGA
۱۰	۳-۲-۱ کاربردهای TGA
۱۳	۴-۲-۱ منابع خطا در آزمایش‌های تجزیه وزن‌سنجی حرارتی
۱۴	۵-۲-۱ کالیبراسیون TGA
۱۴	۳-۱ تجزیه حرارتی تفاضلی
۱۷	۱-۳-۱ کاربردهای DTA
۱۹	۲-۳-۱ کالیبراسیون DTA
۱۹	۳-۳-۱ عوامل مؤثر بر کارایی DTA
۲۱	۴-۱ گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)
۲۱	۱-۴-۱ دستگاه‌وری DSC
۲۴	۲-۴-۱ کاربردهای DSC
۲۵	۵-۱ مقایسه روش‌های گرماسنجی روبشی تفاضلی و تجزیه حرارتی تفاضلی
۲۷	۶-۱ روش‌های تلفیقی
۲۸	۷-۱ سایر روش‌های تجزیه حرارتی
۲۸	۱-۷-۱ تجزیه حرارتی مکانیکی (TMA)
۲۸	۲-۷-۱ تجزیه حرارتی صوتی (ATA)

۲۹	۳-۷-۱ میکروسکوپی حالت داغ (HSM)
۲۹	۴-۷-۱ تجزیه حرارتی الکتریکی
۲۹	۵-۷-۱ تجزیه و آشکارسازی گازهای حاصل از فرایند حرارتی نمونه
۳۰	خلاصه فصل اول
۳۰	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل اول
۳۱	خودآزمایی تشریحی فصل اول
۳۳	فصل دوم: کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC)
۳۳	هدف کلی
۳۳	هدف‌های یادگیری
۳۴	مقدمه
۳۶	۱-۲ تاریخچه کروماتوگرافی مایع (LC)
۳۷	۲-۲ کروماتوگرافی با بستر مسطح
۴۰	۱-۲-۲ شاخص‌های کروماتوگرافی مسطح
۴۲	۲-۲-۲ کروماتوگرافی مسطح دوبعدی
۴۳	۳-۲ کروماتوگرافی ستونی
۴۵	۴-۲ دستگاه‌وری کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا
۴۵	۱-۴-۲ ستون تجزیه‌ای کروماتوگرافی
۴۶	۲-۴-۲ ستون محافظ
۴۷	۳-۴-۲ آشکارساز
۵۵	۴-۴-۲ دماپا
۵۵	۵-۴-۲ پمپ حلال
۵۷	۶-۴-۲ سامانه‌های برنامه‌ریزی و کنترل
۵۸	۷-۴-۲ سامانه‌های ورود نمونه به HPLC
۶۱	۸-۴-۲ پرکننده‌های ستون‌های تجزیه‌ای HPLC
۶۳	۵-۲ کروماتوگرافی تقسیمی
۶۴	۱-۵-۲ انتخاب ستون در HPLC
۶۵	۲-۵-۲ انتخاب حلال
۷۱	۳-۵-۲ کروماتوگرافی تقسیمی اصلاح‌شده
۷۴	۶-۲ کروماتوگرافی جذب سطحی
۷۴	۱-۶-۲ انتخاب حلال در HPLC جذب سطحی
۷۴	۲-۶-۲ کاربردهای کروماتوگرافی جذب سطحی
۷۵	۷-۲ کروماتوگرافی تبادل یونی
۷۶	۱-۷-۲ کروماتوگرافی تبادل یونی با ستون‌های فرونشاننده شوینده
۷۸	۲-۷-۲ کروماتوگرافی یون طردی
۷۹	۸-۲ کروماتوگرافی اندازه طردی
۸۴	خلاصه فصل دوم

۸۵	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل دوم
۸۶	خودآزمایی تشریحی فصل دوم
۸۹	فصل سوم: روش‌های نورتابی
۸۹	هدف کلی
۸۹	هدف‌های یادگیری
۹۰	مقدمه
۹۰	۱-۳ نورتابی فلوئورسانی
۹۲	۱-۱-۳ آسایش ارتعاشی
۹۳	۲-۱-۳ تبدیل درونی
۹۳	۳-۱-۳ نشر فلوئورسانی
۹۳	۴-۱-۳ تبدیل بیرونی
۹۳	۵-۱-۳ عبور بین سیستمی
۹۴	۶-۱-۳ نشر فسفرسانی
۹۴	۷-۱-۳ خودفروشنایی
۹۵	۸-۱-۳ خودجذبی
۹۵	۹-۱-۳ تفکیک
۹۵	۱۰-۱-۳ پیش تفکیک
۹۶	۲-۳ دستگاهوری فلوئورسان
۹۷	۱-۲-۳ منبع نور
۹۷	۲-۲-۳ تفکیک‌کننده‌های طول‌موج نور
۹۷	۳-۲-۳ آشکارساز
۹۸	۴-۲-۳ سلول نمونه
۹۸	۳-۳ مبانی نظری فلوئورسان
۱۰۰	۱-۳-۳ تعیین مقدار K با استفاده از یک محلول استاندارد از آنالیت و استفاده از مقدار به دست آمده برای محلول مجهول آنالیت
۱۰۰	۲-۳-۳ روش افزایش استاندارد
۱۰۰	۳-۳-۳ روش منحنی کالیبراسیون (عیاربندی یا درجه‌بندی)
۱۰۱	۴-۳-۳ روش افزایش استاندارد متوالی (استاندارد درونی)
۱۰۳	۴-۳ عوامل مؤثر بر بهره کوآنتومی فلوئورسان
۱۰۴	۱-۴-۳ عوامل ساختاری
۱۰۷	۲-۴-۳ عوامل محیطی
۱۰۹	۵-۳ اندازه‌گیری نشر فسفرسان
۱۱۱	۱-۵-۳ روش تبخیری
۱۱۱	۲-۵-۳ روش مایسل
۱۱۱	۶-۳ کاربردهای روش‌های فوتونورتابی
۱۱۲	۱-۶-۳ اندازه‌گیری یون‌های فلزی

۱۱۳	۲-۶-۳ تعیین فلوئوریمتری مولکول‌های آلی
۱۱۳	۳-۶-۳ استفاده از روش‌های فوتون‌تابی به‌عنوان آشکارساز HPLC
۱۱۴	۴-۶-۳ اندازه‌گیری طول عمر نورتابی مولکول‌ها
۱۱۴	۷-۳ نورتابی شیمیایی
۱۱۵	۱-۷-۳ دستگاه‌وری نورتابی شیمیایی
۱۱۶	۲-۷-۳ کاربردهای تجزیه‌ای نورتابی شیمیایی
۱۲۰	خلاصه فصل سوم
۱۲۰	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل سوم
۱۲۱	خودآزمایی تشریحی فصل سوم
۱۲۵	فصل چهارم: طیف‌سنجی پرتو ایکس
۱۲۵	هدف کلی
۱۲۵	هدف‌های یادگیری
۱۲۶	مقدمه
۱۲۷	۱-۴ تولید و نشر پرتو ایکس
۱۲۸	۱-۱-۴ تولید پرتو ایکس از طریق بمباران الکترونی
۱۳۴	۲-۱-۴ تولید پرتو ایکس توسط منابع پرتوزا
۱۳۶	۳-۱-۴ تولید پرتو ایکس به روش فلوئورسانی (XRF)
۱۳۶	۴-۱-۴ منابع سینکروترونی
۱۳۶	۲-۴ جذب پرتو ایکس
۱۳۹	۳-۴ پراش پرتو ایکس
۱۴۳	۴-۴ فلوئورسان پرتو ایکس
۱۴۴	۵-۴ دستگاه‌وری
۱۴۵	۱-۵-۴ جداکننده طول‌موج
۱۵۰	۲-۵-۴ آشکارسازهای پرتو ایکس
۱۵۲	۳-۵-۴ پردازشگر
۱۵۴	۴-۵-۴ مقیاسگرها و شمارشگرها
۱۵۴	۵-۵-۴ نمایشگر یا ثبات
۱۵۵	۶-۴ انواع طیف‌سنج‌های فلوئورسان پرتو ایکس
۱۵۸	۷-۴ تجزیه کیفی و نیمه‌کمی با طیف‌سنج فلوئورسان پرتو ایکس
۱۵۹	۱-۷-۴ اثرات بافت
۱۶۱	۲-۷-۴ برخی کاربردهای کمی فلوئورسانی پرتو ایکس
۱۶۲	۳-۷-۴ مزایا و معایب روش‌های فلوئورسانی پرتو ایکس
۱۶۳	۸-۴ پراش پرتو ایکس (XRD)
۱۶۴	۱-۸-۴ شناسایی ترکیبات بلوری
۱۶۵	۲-۸-۴ آشکارسازی الگوهای پراش
۱۶۷	۹-۴ ریزردیاب الکترونی

۱۶۷	خلاصه فصل چهارم
۱۶۸	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل چهارم
۱۷۰	خودآزمایی تشریحی فصل چهارم
۱۷۳	فصل پنجم: مطالعه سطح به روش‌های طیف‌سنجی و میکروسکوپی
۱۷۳	هدف کلی
۱۷۳	هدف‌های یادگیری
۱۷۴	مقدمه
۱۷۴	۱-۵ مطالعه سطح
۱۷۵	۲-۵ ابزارهای مطالعه سطح
۱۷۵	۳-۵ نمونه‌برداری از سطح
۱۷۶	۴-۵ آلودگی سطح
۱۷۶	۵-۵ انواع دستگاه‌های طیف‌سنجی سطح
۱۷۷	۶-۵ طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس (XPS)
۱۷۸	۱-۶-۵ اصول XPS
۱۸۰	۲-۶-۵ دستگاه‌وری XPS
۱۸۲	۳-۶-۵ کاربردهای XPS
۱۸۶	۷-۵ طیف‌سنجی الکترون اوژه (AES)
۱۸۹	۱-۷-۵ اصول AES
۱۹۱	۲-۷-۵ دستگاه‌وری AES
۱۹۵	۳-۷-۵ کاربردهای AES
۱۹۷	۸-۵ طیف‌سنجی جرمی یون ثانویه (SIMS)
۱۹۸	۹-۵ طیف‌سنج جرمی ریزردیاب لیزری
۱۹۸	۱۰-۵ ریزردیاب الکترونی
۱۹۹	۱۱-۵ میکروسکوپ‌های الکترونی
۲۰۰	۱-۱۱-۵ میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)
۲۰۶	۲-۱۱-۵ میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)
۲۱۲	۳-۱۱-۵ میکروسکوپ ردیاب روبشی (SPM)
۲۱۴	۴-۱۱-۵ میکروسکوپ تونل زنی روبشی (STM)
۲۱۸	۵-۱۱-۵ میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)
۲۲۳	۶-۱۱-۵ میکروسکوپ نیروی شیمیایی
۲۲۵	خلاصه فصل پنجم
۲۲۵	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل پنجم
۲۲۶	خودآزمایی تشریحی فصل پنجم
۲۲۹	فصل ششم: طیف‌سنجی جرمی اتمی
۲۲۹	هدف کلی

۲۲۹	هدف‌های یادگیری
۲۲۹	مقدمه
۲۳۱	۱-۶ مفاهیم طیف‌سنجی جرمی
۲۳۲	۲-۶ اجزای طیف‌سنج‌های جرمی
۲۳۴	۳-۶ طیف‌سنج‌های جرمی اتمی
۲۳۶	۱-۳-۶ طیف‌سنج جرمی با پلاسمای جفت‌شده القایی
۲۴۱	۲-۳-۶ طیف‌سنج جرمی اتمی با منبع یونش جرقه
۲۴۳	۳-۳-۶ طیف‌سنج جرمی اتمی با منبع یونش حرارتی
۲۴۳	۴-۳-۶ طیف‌سنج جرمی با منبع یونش تخلیه افروزشی
۲۴۴	۴-۶ تجزیه‌گرهای یونی
۲۴۵	۵-۶ آشکارسازهای طیف‌سنج‌های جرمی
۲۴۶	۱-۵-۶ آشکارساز تکثیرکننده الکترون
۲۴۸	۲-۵-۶ فنجان فارادی
۲۴۹	۳-۵-۶ صفحات عکاسی
۲۵۰	۴-۵-۶ آشکارساز سوسوزن
۲۵۰	۶-۶ اثرات تداخلی در طیف‌سنجی جرمی اتمی
۲۵۳	۷-۶ تجزیه عنصری سطح نمونه‌های جامد با طیف‌سنج جرمی
۲۵۳	۱-۷-۶ طیف‌سنجی جرمی اتمی یون ثانویه
۲۵۵	۲-۷-۶ طیف‌سنج جرمی اتمی ریزردیاب لیزری
۲۵۶	خلاصه فصل ششم
۲۵۶	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل ششم
۲۵۷	خودآزمایی تشریحی فصل ششم
۲۵۹	فصل هفتم: طیف‌سنجی جرمی مولکولی
۲۵۹	هدف کلی
۲۵۹	هدف‌های یادگیری
۲۵۹	مقدمه
۲۶۳	۱-۷ دستگاهوری طیف‌سنج جرمی مولکولی
۲۶۳	۱-۱-۷ سامانه‌های ورودی نمونه
۲۶۴	۲-۱-۷ منابع یونش
۲۸۳	۲-۷ قدرت تفکیک طیف‌سنج‌های جرمی
۲۸۵	۳-۷ طیف‌سنج‌های جرمی رایانه‌ای
۲۸۶	۴-۷ کاربردهای طیف‌سنج جرمی مولکولی
۲۸۷	۱-۴-۷ شناسایی ترکیبات خالص
۲۸۷	۲-۴-۷ جرم‌های مولکولی حاصل از طیف‌های جرمی
۲۸۷	۳-۴-۷ تعیین فرمول مولکولی از روی جرم‌های مولکولی دقیق
۲۸۸	۴-۴-۷ تعیین فرمول مولکولی از نسبت‌های ایزوتوپی

۲۹۱	۷-۴-۵ تعیین اطلاعات ساختاری از الگوهای قطعه‌قطعه‌شدن
۲۹۲	۷-۴-۶ شناسایی ترکیب با مقایسه طیف‌ها
۲۹۲	۷-۴-۷ سامانه‌های جستجوی کتابخانه رایانه‌ای
۲۹۳	۷-۵-۵ تجزیه مخلوط‌ها با روش‌های طیفی جرمی اتصالی
۲۹۳	۷-۵-۱ کروماتوگرافی / طیف‌سنج جرمی
۲۹۴	۷-۵-۲ الکتروفورز موئینه‌ای / طیف‌سنج جرمی
۲۹۴	۷-۵-۳ طیف‌سنج جرمی متوالی
۲۹۶	۷-۵-۴ کاربردهای طیف‌سنجی جرمی متوالی
۲۹۷	خلاصه فصل هفتم
۲۹۷	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هفتم
۲۹۹	خودآزمایی تشریحی فصل هفتم
۳۰۱	فصل هشتم: اصول و کاربردهای لیزر
۳۰۱	هدف کلی
۳۰۱	هدف‌های یادگیری
۳۰۲	مقدمه
۳۰۲	۸-۱ اصول لیزر
۳۰۴	۸-۱-۱ نشر خودبه‌خودی و نشر تهییجی
۳۰۷	۸-۱-۲ تشدیدکننده یا رزونانس‌دهنده
۳۰۹	۸-۱-۳ سامانه‌های چندترازی مورد استفاده برای ایجاد لیزر
۳۱۲	۸-۱-۴ نقش حفره نوری
۳۱۴	۸-۲ انواع لیزر
۳۱۵	۸-۲-۱ لیزرهای تخلیه گاز
۳۲۰	۸-۲-۲ لیزرهای دیود نیم‌رسانا
۳۲۳	۸-۲-۳ لیزرهای حالت جامد
۳۲۷	۸-۲-۴ لیزرهای مایع رنگی
۳۲۸	۸-۳ کاربردهای لیزر
۳۲۸	۸-۳-۱ کاربردهای صنعتی
۳۳۱	۸-۳-۲ کاربردهای آزمایشگاهی لیزر
۳۳۵	۸-۳-۳ دیگر کاربردهای لیزر
۳۳۷	خلاصه فصل هشتم
۳۳۷	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هشتم
۳۳۹	خودآزمایی تشریحی فصل هشتم
۳۴۱	فصل نهم: آمار در شیمی تجزیه
۳۴۱	هدف کلی
۳۴۱	هدف‌های یادگیری

۳۴۲	مقدمه
۳۴۲	۱-۹ انواع خطا در داده‌های تجربی
۳۴۴	۲-۹ یادآوری برخی از مفاهیم آماری مهم
۳۴۴	۱-۲-۹ انحراف استاندارد و واریانس
۳۴۵	۲-۲-۹ فاصله اطمینان در داده‌های تجربی
۳۴۹	۳-۲-۹ ارقام بامعنی در داده‌های تجربی
۳۵۱	۴-۲-۹ اعمال انحراف استاندارد در محاسبات
۳۵۱	۵-۲-۹ تکرارپذیری و تکثیرپذیری
۳۵۳	۳-۹ آزمون‌های آماری
۳۵۳	۱-۳-۹ آزمون‌های رد داده مشکوک (دورافتاده)
۳۵۶	۲-۳-۹ آزمون مقایسه میانگین تجربی با مقدار واقعی (آزمون t)
۳۵۶	۳-۳-۹ آزمون مقایسه دو مقدار میانگین (آزمون t)
۳۵۷	۴-۳-۹ آزمون مقایسه دقت (آزمون F)
۳۵۹	۴-۹ ارتباط علامت تجزیه‌ای با غلظت
۳۶۴	خلاصه فصل نهم
۳۶۵	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل نهم
۳۶۶	خودآزمایی تشریحی فصل نهم
۳۶۹	پیوست فصل چهارم
۳۷۷	پیوست فصل ششم
۳۹۳	پیوست فصل هفتم
۳۹۹	پاسخنامه
۴۰۱	منابع

پیشگفتار مؤلفین

شیمی تجزیه شاخه‌ای از شیمی است که با شناسایی، جداسازی و تعیین مقدار اجزای سازنده مواد سروکار دارد. زمانی که فارغ‌التحصیلان شیمی جذب بازار کار به‌ویژه در صنایع وابسته به شیمی می‌شوند به اهمیت دانش شیمی تجزیه پی می‌برند. زمانی که یک کارشناس شیمی جذب صنایع فلزی نظیر سرب، روی، مس، آلومینیم و فولاد می‌شود مشاهده می‌کند که آشنابودن با دستگاه‌های جذب و نشر اتمی، فلوئورسانس پرتو ایکس و میکروسکوپ‌های الکترونی تا چه حد می‌تواند موجب برتری چشمگیر فرد با سایر کارشناسان هم‌رده خود شود. دانشجویان رشته شیمی در مقطع کارشناسی در درس شیمی تجزیه دستگاهی (شیمی تجزیه III) با اصول و دستگاه‌های برخی از دستگاه‌های تجزیه‌ای از جمله طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش، جذب و نشر اتمی، طیف‌سنجی مادون قرمز، طیف‌سنجی رامان، طیف‌سنجی رزونانس مغناطیس هسته و کروماتوگرافی گازی آشنا شده و نحوه کار عملی با برخی از آن‌ها را در درس آزمایشگاه شیمی تجزیه دستگاهی آموزش می‌بینند. در این کتاب، دانشجویان با چند دستگاه تجزیه‌ای پرکاربرد دیگر از جمله دستگاه‌های تجزیه حرارتی، کروماتوگرافی مایع، روش‌های نورتابی، فلوئورسان و پراش پرتو ایکس و در نهایت با دستگاه‌های مطالعه سطح آشنا خواهند شد. در تألیف این کتاب سعی شده است تا در هر فصل، ابتدا اصول و مبانی هر دستگاه تجزیه‌ای شرح داده شود، سپس اجزای دستگاهی اصلی آن ذکر شده و در نهایت کاربردهای تجزیه‌ای آن با ذکر مثال و تمرین نوشته شود. در برخی از فصول‌ها سعی شده است تا تمرین‌هایی با عنوان خودآزمایی که نیازمند مطالعه خارج از

کتاب است ارائه شود تا دانشجویان در کنار مطالعه این کتاب، گاهی برای پاسخ به این سؤال‌ها منابع دیگری را نیز مطالعه کنند. در تدوین این کتاب نهایت سعی و تلاش صورت گرفته است تا اشتباهی در آن رخ ندهد. ولی باتوجه به اینکه این کتاب برای اولین بار چاپ شده است، بدون شک عاری از اشتباه نخواهد بود. امیدوار هستیم که کلیه صاحب‌نظران، اساتید محترم و دانشجویان عزیز با ارسال اشکالات کتاب، راهنمایی و پیشنهادات خود به آدرس ایمیل karami_h@yahoo.com مؤلفین کتاب را در رفع نواقص و کاستی‌های آن یاری دهند. دانشجویان عزیز، پیوست کتاب برای مطالعه بیشتر تألیف شده است و سؤالی در آزمون پایان ترم از پیوست کتاب طرح نخواهد شد. در پایان از همکاری ارزشمند سرکار خانم فاطمه صادقی (فارغ‌التحصیل مقطع کارشناسی ارشد شیمی تجزیه دانشگاه پیام‌نور مرکز ابهر) در رفع اشکالات نگارشی کتاب صمیمانه تقدیر می‌نماییم.

حسن کرمی - محمدعلی کریمی

اعضای هیأت علمی گروه شیمی دانشگاه پیام نور

مرکز ابهر - مرکز تهران شرق

بهار ۱۳۹۹

فصل اول

روش‌های تجزیه حرارتی

هدف کلی

در این فصل، روش‌های تجزیه‌ای مبتنی بر اعمال گرما به نمونه مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

هدف‌های یادگیری

- با مطالعه این فصل قادر خواهید بود به سؤالات زیر پاسخ دهید:
۱. روش‌های مختلف تجزیه حرارتی نمونه‌ها را نام ببرید.
 ۲. هریک از روش‌های تجزیه حرارتی برای چه نمونه‌هایی مناسب است؟
 ۳. منحنی‌های گرمانگاشت چگونه تفسیر می‌شوند؟
 ۴. روش وزن‌سنجی حرارتی چه اطلاعاتی را در اختیار شما قرار می‌دهد؟
 ۵. روش حرارتی تفاضلی چه تفاوت‌هایی با روش وزن‌سنجی حرارتی دارد؟
 ۶. کالری‌سنجی روبشی تفاضلی چیست و به چند روش می‌تواند اجرا شود؟

مقدمه

با اعمال حرارت به یک ماده، فرایندهای فیزیکی و شیمیایی مختلفی بسته به نوع ماده می‌تواند رخ دهد که مطالعه این فرایندها از طریق اندازه‌گیری یک خاصیت فیزیکی نظیر وزن، دما و یا گرما می‌تواند عملی شود. مطالعه اثر حرارت بر روی مواد تاریخیچه‌ای

طولانی دارد و از زمان انسان‌های نخستین شروع شده و تاکنون که روش‌های گرماسنجی گسترش یافته است، ادامه دارد. به تدریج با گذشت زمان و توسعه تجهیزات و دستگاه‌های آزمایشگاهی، روش‌های تجزیه حرارتی بهبود و گسترش یافته است. در این راه روش‌های منحنی‌های حرارتی مواد معدنی متعددی را تهیه نمود که در آن‌ها فرایندهای گرماگیر و گرماده قابل تشخیص بود.

پایه‌گذاری کنفدراسیون بین‌المللی تجزیه حرارتی در سال ۱۹۶۵ میلادی در آبردین^۱ و پیشرفت‌های بزرگ در ساخت دستگاه‌های تجاری قابل دسترس، باعث گردید که تجزیه حرارتی به زمینه کاربردی کاملاً فعالی تبدیل شود. بحث‌های زیادی در ارتباط با این سؤال مطرح شده است که آیا روش‌های تجزیه حرارتی را می‌توان جزء روش‌های تجزیه‌ای قرارداد یا خیر؟ با توجه به پایه‌گذاری روش‌های حرارتی بر سه شاخص نمونه، معرف و علامت^۲ و با در نظر گرفتن حرارت به عنوان معرف می‌توان نتیجه گرفت که روش‌های تجزیه حرارتی در زیرگروه روش‌های تجزیه‌ای قرار داد.

هرگاه به ماده‌ای بر طبق یک برنامه مشخص و کنترل شده، حرارت داده شود، تغییراتی در خواص فیزیکی و شیمیایی آن ماده پدید می‌آید که اندازه‌گیری این تغییرات اساس روش‌های تجزیه حرارتی می‌باشد. به عبارت دیگر، تجزیه حرارتی، مطالعه اثرات حرارت بر روی مواد مختلف با دستگاه‌های تجزیه‌ای می‌باشد.

۱-۱ دسته‌بندی روش‌های تجزیه حرارتی

در یک تقسیم‌بندی کلی، می‌توان روش‌های تجزیه حرارتی را به دو دسته دینامیکی و تعادلی طبقه‌بندی کرد. روش‌های دینامیکی شامل روش‌هایی است که در آن‌ها، برخی از خواص فیزیکی نمونه نظیر وزن یا دمای آن به طور پیوسته در طول زمان با اعمال برنامه کنترل شده حرارتی اندازه‌گیری می‌شود. روش‌های هم‌دمای نیز در زمره روش‌های دینامیکی قرار دارند زیرا در روش‌های هم‌دمای، نمونه در طی زمان اندازه‌گیری در شرایط غیرتعادلی قرار دارد. روش‌های تعادلی، روش‌هایی هستند که در آن‌ها یک خاصیت فیزیکی از نمونه بعد از برقراری تعادل اندازه‌گیری می‌شود. از این روش‌ها می‌توان به

1. Aberdeen

2. Signal

روش‌های تجزیه حرارتی ۳

روش گرماسنجی آدیاباتیک کلاسیک اشاره نمود. روش‌های تعادلی نسبت به روش‌های دینامیکی دقیق‌تر ولی پیچیده‌تر هستند.

هدف از این فصل مطالعه روش‌های حرارتی دینامیکی می‌باشد. روش‌های حرارتی دینامیکی برای بررسی و محاسبه داده‌هایی نظیر ظرفیت گرمایی، گرمای ذوب، گرمای تبخیر، انرژی فعال‌سازی، درجه واکنش، سرعت تبلور، دمای تبدیل فازهای مختلف، ضرایب انبساط گرمایی، گرمای واکنش و بسیاری از پارامترهای مرتبط دیگر مفید می‌باشند.

اعمال حرارت به نمونه در یک محدوده دمایی وسیع می‌تواند باعث ایجاد تغییرات بسیاری در خواص نمونه شود. یکی از این تغییرات، تغییر وزن نمونه در طول مدت اعمال گرما می‌باشد. اندازه‌گیری تغییر در وزن نمونه، اساس روش تجزیه وزن‌سنجی حرارتی (TGA)^۱ را تشکیل می‌دهد. درحالی‌که اندازه‌گیری تغییرات انرژی اساس روش‌های تجزیه حرارتی تفاضلی (DTA)^۲ و گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)^۳ می‌باشند. این روش‌ها از جمله مهم‌ترین روش‌های تجزیه حرارتی دینامیکی می‌باشند که در این کتاب به بررسی آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۲-۱ تجزیه وزن‌سنجی حرارتی

در روش تجزیه وزن‌سنجی حرارتی، میزان افزایش و یا کاهش وزن نمونه در زمان اعمال برنامه حرارتی کنترل‌شده با دقت ثبت می‌شود. هر نمونه‌ای می‌تواند در اثر حرارت دچار دو دسته تغییر فیزیکی و شیمیایی شود. تغییرات فیزیکی شامل جذب فیزیکی گاز بر سطح نمونه، واجذب گاز از سطح نمونه، تبخیر حلال، از دست دادن آب تبلور، ذوب، تبخیر و تصعید می‌باشد. تغییرات شیمیایی احتمالی در نمونه شامل تخریب حرارتی، اکسیداسیون و سایر واکنش‌های شیمیایی می‌باشد.

اعمال حرارت کنترل‌شده به نمونه، اندازه‌گیری و ثبت دقیق وزن نمونه در هر لحظه نیازمند دستگاهی دقیق و قابل اعتماد است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

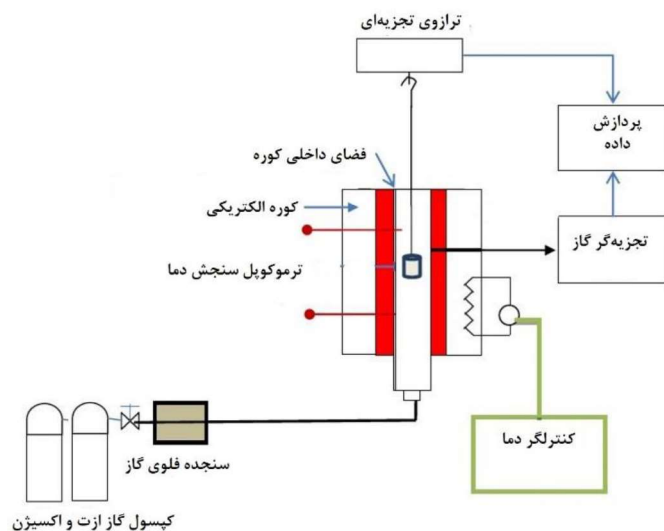
1. Thermal Gravimetric Analysis
2. Differential Thermal Analysis
3. Differential Scanning Calorimetry

۱-۲-۱ دستگاه‌وری TGA

دستگاه TGA شامل اجزای اصلی زیر می‌باشد:

- * کوره الکتریکی بسیار دقیق برای اعمال برنامه دمایی
- * ترازوی کوچک و بسیار دقیق برای اندازه‌گیری وزن نمونه
- * برنامه‌ریز حرارتی
- * سامانه دمش گاز
- * ثبات و نمایشگر
- * سایر قطعات دستگاهی

در شکل ۱-۱، اجزای یک دستگاه TGA نشان داده شده است. در ادامه به توضیح این اجزا پرداخته خواهد شد.



شکل ۱-۱. اجزای یک دستگاه تجزیه وزن‌سنجی حرارتی

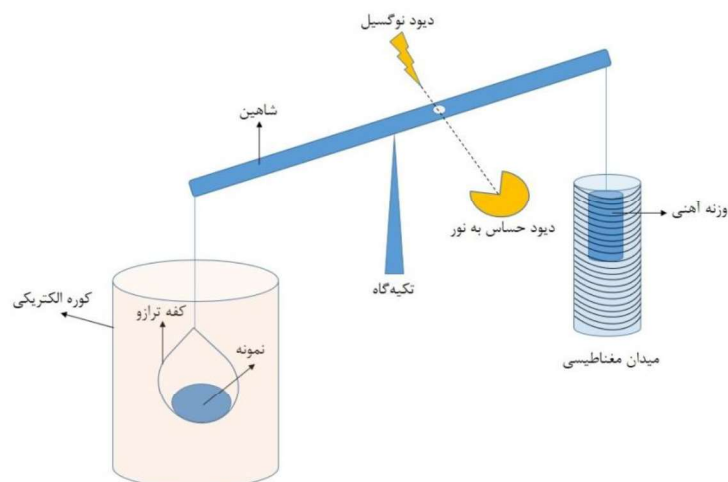
الف) کوره الکتریکی: کوره الکتریکی درواقع قلب دستگاه تجزیه حرارتی می‌باشد که ظرف نمونه (کفه ترازوی تجزیه‌ای) را در خود جای می‌دهد. این کوره کوچک تنها شامل یک فضا برای معلق‌ماندن کفه ترازوی حاوی نمونه با وزن ۵ تا ۲۵ میلی‌گرم می‌باشد. کوره قادر است در یک محدوده دمایی وسیع (معمولاً دمای محیط تا 1500°C) دمای

روش‌های تجزیه حرارتی ۵

نمونه را با سرعت ۱ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه افزایش دهد. علاوه‌بر برنامه خطی افزایش دما، کوره می‌تواند گرما را به گونه‌ای به نمونه اعمال کند که دمای نمونه به‌طور دقیق ثابت بماند (روش هم‌دما). کوره الکتریکی اغلب از نوع غیرالقایی و شامل یک سیم‌پیچ است که در اطراف یک میله سرامیکی عایق پیچیده می‌شود و در داخل کوره قرار می‌گیرد. کوره الکتریکی دستگاه TGA اغلب مجهز به ابزار سردکننده می‌باشد تا بتواند در پایان آزمایش دمای کوره را کاهش دهد. در کوره‌هایی که در محدوده دمای اتاق تا دمای 1000°C کار می‌کنند، از سیم‌پیچ کرومل یا نیکروم (آلیاژ نیکل-کروم) و در کوره‌هایی که در محدوده دمای اتاق تا دمای 1500°C کار می‌کنند از پلاتین یا آلیاژ پلاتین-رودیم استفاده می‌شود. پیشرفت‌های جدید در زمینه کوره‌های ماریپچ، امکان ساخت دستگاه‌های TGA تا دمای 2000°C را نیز فراهم کرده است.

وجود سطح داغ یکنواخت در یک ترازوی حرارتی خوب، نقش اساسی دارد. این قسمت در یک کوره با وزن معقول به راحتی فراهم می‌شود. اما یک کوره با وزن زیاد نسبت به کوره‌ای با وزن کم، کندتر گرم و سرد می‌شود بنابراین زمان تجزیه طولانی می‌شود و این موضوع در روش‌های هم‌دما، یک عیب محسوب می‌شود. کوره‌هایی با وزن کم، خیلی سریع گرم و سرد می‌شوند ولی گرمادهی خطی در آن‌ها مشکل است. بنابراین تعجب‌آور نیست که طراحی کوره‌های تجاری بسیار متنوع باشد. از طرف دیگر، نیاز به تجزیه حرارتی تحت اتمسفرهای مختلف و تجزیه گازهای آزادشده از نمونه، منجر به تنوع بیشتری در طراحی کوره‌ها شده است.

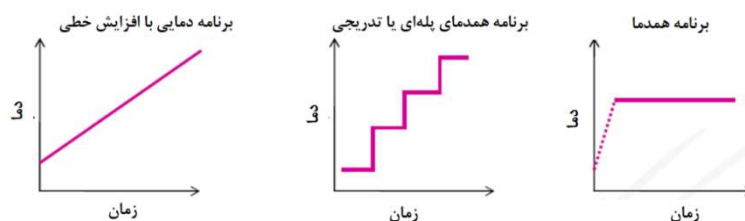
ب) ترازوی تجزیه‌ای: از ویژگی‌های یک ترازوی تجزیه‌ای، ظرفیت معقول، صحت، حساسیت، تکرارپذیری، پایداری و پاسخ‌دهی سریع آن است. دینوع ترازوی صفرکننده و انحراف‌دهنده در دستگاه‌های وزن‌سنجی حرارتی استفاده می‌شود که نوع صفرکننده بیشترین کاربرد را دارد، لذا این ترازو شرح داده می‌شود. در ترازوی صفرکننده که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، با تغییر وزن نمونه، شاهین ترازو از وضعیت عادی خود منحرف می‌شود. در اثر انحراف شاهین، حسگر نصب‌شده در مسیر شاهین (دیود و فتودیود)، این انحراف را تشخیص داده و متناسب با میزان انحراف، نیروی میدان مغناطیسی را تغییر می‌دهد تا شاهین ترازو به وضعیت صفر برگردد. از روی میزان تغییر قدرت میدان مغناطیسی میزان تغییر وزن نمونه قابل محاسبه و نمایش است.



شکل ۱-۲. نحوه عملکرد ترازوی صفرکننده

در ترازوی انحراف دهنده، مقدار انحراف شاهین نسبت به موقعیت اولیه، توسط حسگر نوری اندازه گیری شده و به مقدار تغییر وزن، نسبت داده می شود.

ج) برنامه ریز حرارتی: این قسمت مستقیماً به کوره متصل است و در طول آزمایش تحت کنترل می باشد. اگر کوره قلب دستگاه تجزیه وزن سنجی حرارتی باشد، برنامه ریز حرارتی مغز جهت دهنده عمل آن است. برنامه ریز حرارتی یک حسگر در تماس مستقیم با کوره دارد که دمای دقیق کوره را اندازه گیری و به برنامه ریز ارسال می کند و براساس آن توان الکتریکی کوره تنظیم می شود. توسعه برنامه ریزهای حالت جامد مجهز به وسایل زمان سنج، امکان فراهم نمودن سرعت های متنوع گرمادهی و برنامه های حرارتی پیچیده (شیوه های سرد و گرم کردن خطی، هم دما و هم دمای تدریجی) را با داشتن یک ترازوی حرارتی پیشرفته فراهم می سازد. در شکل ۱-۳ سه شیوه مختلف برنامه دمایی نشان داده شده است.



شکل ۱-۳. سه برنامه دمایی مختلف که در دستگاه های تجزیه حرارتی استفاده می شود.

(د) سامانه دمش گاز: اغلب دستگاه‌های تجزیه حرارتی مجهز به ابزاری برای دمش گازهای مختلف به داخل کوره می‌باشند تا اثر اتمسفر بر رفتار دمایی نمونه مشخص شود. این امکان وجود دارد که در طول یک آزمایش، چندین بار نوع گاز دمشی به داخل کوره تغییر کند. وقتی گاز بی‌اثری مثل نیتروژن به داخل کوره دمیده می‌شود واکنش‌های وابسته به اکسیژن نظیر اکسایش انجام نخواهد شد. اما زمانی که اکسیژن یا هوا به داخل کوره دمیده شود، اگر نمونه به اکسیژن حساس باشد، با اکسیژن واکنش داده و وزن نمونه تغییر خواهد کرد. بنابراین انتظار می‌رود که منحنی وزن برحسب دما (گرمانگاشت) برای نمونه در دو اتمسفر نیتروژن و اکسیژن متفاوت باشد.

(د) ثبات و نمایشگر: در هر دستگاه تجزیه‌ای، ابزاری لازم است تا داده‌های حاصل را ثبت کرده و به کاربر نمایش دهد. در اینجا نیز ثبت و نمایش پیوسته داده‌های وزن به‌عنوان تابعی از دما ضروری است. نمایش داده‌های دستگاه وزن‌سنجی حرارتی می‌تواند به سه شیوه رسم و نمایش داده شود:

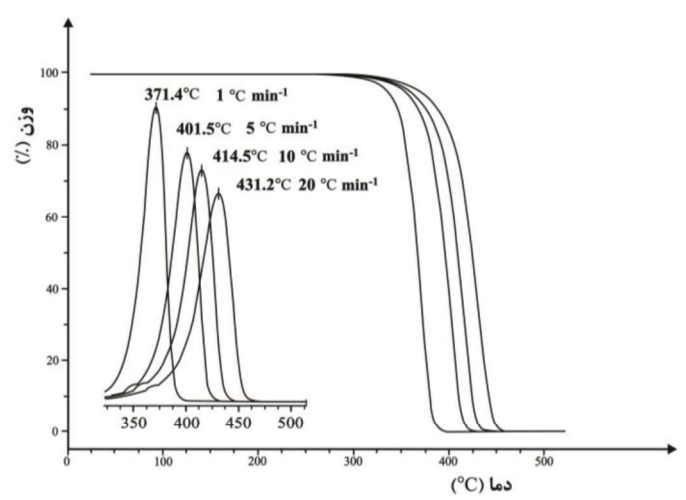
- منحنی وزن نمونه (میلی گرم) برحسب دما (درجه سانتی‌گراد)
- منحنی تغییر وزن نمونه (درصد) برحسب دما (سانتی‌گراد)
- منحنی مشتق اول داده‌های وزن برحسب دما

۲-۲-۱ متغیرهای کاری TGA

کار با دستگاه TGA نیازمند تجربه و تبحر می‌باشد. یک کاربر باتجربه می‌داند که شرایط انجام آزمایش می‌تواند بر نتیجه آزمایش مؤثر باشد. ازجمله مهم‌ترین شرایط کاری که نتیجه آزمایش را تحت تأثیر قرار می‌دهند، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

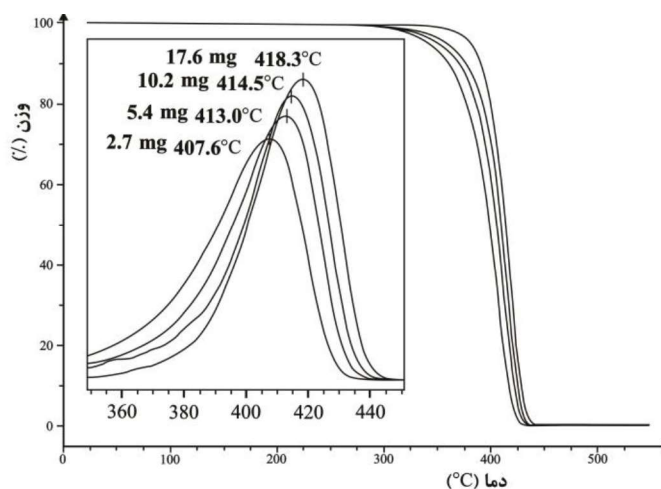
الف) سرعت گرم کردن در برنامه دمایی (نرخ گرمادهی): سرعت گرم کردن

نمونه می‌تواند دمای فرایندهای حاصل از گرم کردن نظیر تخریب نمونه را تغییر دهد. در شکل ۴-۱ اثر سرعت گرمادهی به نمونه پلی‌استایرن نشان داده شده است. با افزایش سرعت گرم کردن از ۱ تا $20^{\circ}\text{C min}^{-1}$ ، دمای تخریب پلی‌استایرن از $371/4$ تا $431/2$ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. افزایش سرعت گرم کردن به معنی کاهش زمان ماند نمونه در هر دما می‌باشد در نتیجه زمان رسیدن به دمای نهایی کم می‌شود و نمونه می‌تواند دمای بالاتری را تحمل نماید.



شکل ۱-۴. اثر سرعت گرم کردن بر دمای تخریب پلی استایرن

ب) وزن اولیه نمونه: تجربه نشان داده است که استفاده از نمونه‌هایی با وزن‌های متفاوت گرمانگاشت‌های متفاوتی را نشان می‌دهد. در شکل ۱-۵ این واقعیت نشان داده شده است.



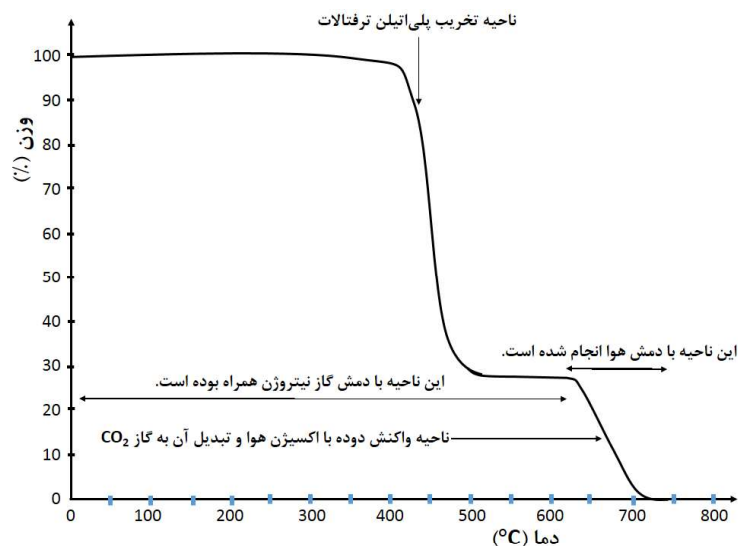
شکل ۱-۵. اثر وزن بر گرمانگاشت پلی استایرن

ج) شرایط اتمسفر کوره: نوع گازی که به داخل کوره دمیده می‌شود می‌تواند تغییرات فاحشی را در گرمانگاشت نمونه ایجاد نماید. به عنوان مثال، اگر گرمانگاشت

روش‌های تجزیه حرارتی ۹

پلی‌اتیلن رسانا (حاوی دوده) در جو بی‌اثر نیتروژن تهیه شود با زمانی که این گرمانگاشت در جو هوا تهیه شود، کاملاً متفاوت می‌باشد. زیرا در جو بی‌اثر، پلی‌اتیلن تخریب شده و به گاز تبدیل می‌شود ولی دوده آن برجا می‌ماند. درحالی‌که حضور هوا باعث می‌شود تا دوده نیز به منوکسید یا دی‌اکسیدکربن تبدیل شود. تخریب حرارتی پلی‌اتیلن ترفتالات نیز رفتاری مشابه پلی‌اتیلن رسانا دارد (شکل ۶-۱).

تمرین ۱-۱. باتوجه به شکل ۶-۱، درصد دوده در پلی‌اتیلن ترفتالات را تعیین کنید.
جواب: باتوجه به شکل ۶-۱، در اتمسفر خشتی (گاز نیتروژن)، کاهش وزن پلی‌اتیلن در گستره دمایی ۴۰۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. این کاهش وزن معادل ۷۲ درصد وزن اولیه نمونه است. در این محدوده دمایی، پلی‌اتیلن به مولکول‌های گازی تجزیه می‌شود. در این حالت تنها دوده موجود در پلی‌اتیلن باقی می‌ماند. دومین کاهش وزن نمونه معادل ۲۸ درصد وزن اولیه نمونه است که در گستره دمایی ۶۲۵ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و با دمش گاز اکسیژن انجام می‌شود. در این محدوده دمایی، دوده موجود در پلی‌اتیلن (معادل ۲۸ درصد وزنی) با اکسیژن ترکیب شده و به گاز CO_2 تبدیل می‌شود.

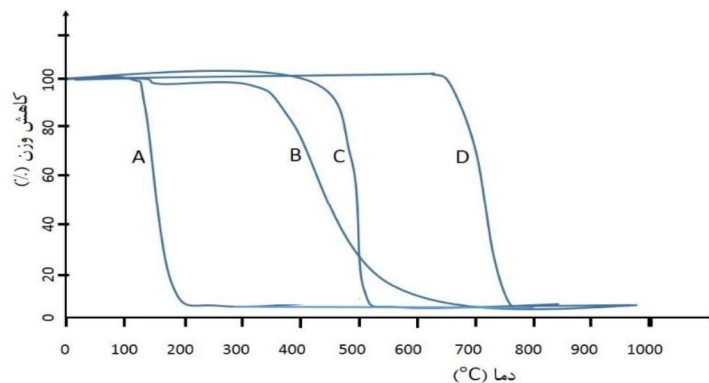


شکل ۶-۱. اثر تغییر گاز دمشی بر گرمانگاشت پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)

۳-۲-۱ کاربردهای TGA

از دستگاه‌های وزن‌سنجی حرارتی می‌توان برای اهداف زیر استفاده نمود:

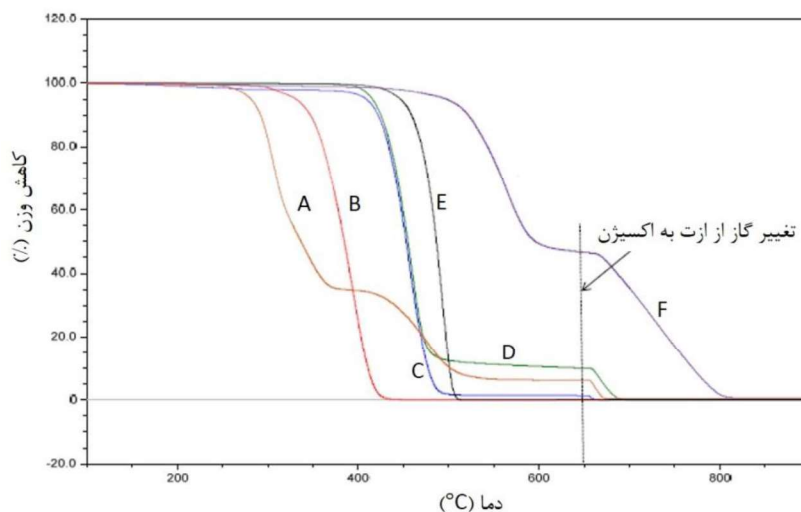
۱. **تعیین پایداری حرارتی مواد:** اعمال برنامه دمایی به نمونه می‌تواند دمای دقیق تخریب و در نتیجه محدوده پایداری دمایی نمونه را مشخص کند. این آزمایش‌ها برای پلیمرها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (شکل ۷-۱). همان‌طور که شکل ۷-۱ نشان می‌دهد پلیمر A در دمای بالاتر از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به سرعت تخریب می‌شود. پلیمر B در دمای حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد دچار کاهش وزن اندکی می‌شود که می‌تواند مربوط به خروج مواد فرار از آن باشد. این پلیمر در محدوده دمایی ۳۵۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت آرامی (۶/۳۳ درصد بر دقیقه) تخریب می‌شود. پلیمر C پایداری بالاتری نسبت به پلیمر B دارد ولی سرعت تخریب آن بالاتر است (۲۷/۱۴ درصد بر دقیقه). پلیمر D بسیار پایدار بوده و تا دمای ۶۸۰ درجه سانتی‌گراد تخریب نمی‌شود. با افزایش دما در محدوده ۶۸۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت زیاد (مشابه پلیمر C) تخریب می‌شود. در دماهای بالاتر از ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، ۵ درصد از وزن اولیه هر پلیمر باقی می‌ماند که مربوط به خاکستر مواد معدنی موجود در پلیمر می‌باشد.



شکل ۷-۱. اثر دما بر تخریب چهار پلیمر A، B، C و D. روبش دما با سرعت ۲۰ درجه بر دقیقه افزایش داده شده است. وزن اولیه نمونه ۲۵ میلی‌گرم می‌باشد.

۲. **تعیین پایداری اکسایشی مواد:** اعمال برنامه دمایی به نمونه در اتمسفر اکسیژن، میزان پایداری ماده را در برابر اکسید شدن نشان خواهد داد. شکل ۸-۱ پایداری حرارتی و پایداری اکسایشی شش پلیمر مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل ۸-۱ نشان می‌دهد، پلیمرهای آلیفاتیک نسبت به پلیمرهای آروماتیک پایداری حرارتی کمتری

دارند. پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) در محدوده دمایی ۳۰۰ تا ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد و پلی‌اتیلن (PE) در محدوده دمایی ۴۷۵ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور کامل تخریب و به گونه‌های گازی شکل تبدیل می‌شوند. پلی‌وینیل کلرید (PVC) در محدوده ۳۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد کلر خود را از دست داده و در محدوده دمایی ۴۳۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بخش هیدروکربنی آن هم تخریب‌شده و کربن آن باقی می‌ماند. کربن باقیمانده در اتمسفر نیتروژن کاملاً پایدار است ولی تغییر اتمسفر خنثی به اتمسفر اکسیژن موجب تبدیل کربن به گاز دی‌اکسیدکربن در دمای ۶۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود. پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) در دمای ۴۲۵ تا ۴۷۵ درجه سانتی‌گراد تخریب می‌شود و باقیمانده کربنی آن با تغییر اتمسفر به اکسیژن بعد از دمای ۶۷۵ درجه سانتی‌گراد سوخته و به گاز تبدیل می‌شود. نایلون ۶۶ رفتاری مشابه PET دارد ولی درصد باقیمانده کربنی آن در اتمسفر نیتروژن کمتر است. پلی‌فنیلن سولفید (PPS) پایداری دمایی بالایی دارد و تا دمای ۵۲۶ درجه سانتی‌گراد مقاوم است. بعد از آن تخریب‌شده و بخش آروماتیک آن به گاز تبدیل می‌شود ولی گوگرد و بخشی از کربن آن باقی می‌ماند که با ورود اکسیژن به فضای کوره، هر دو عنصر باقیمانده سوخته و به گاز تبدیل می‌شوند.



شکل ۸-۱ پایداری حرارتی و پایداری اکسایشی پلیمرهای پلی‌وینیل کلرید (A)، پلی‌متیل متاکریلات PMMA (B)، نایلون ۶۶ (C)، پلی‌اتیلن ترفتالات PET (D)، پلی‌اتیلن PE (E) و پلی‌فنیلن سولفید PPS (F).