بنام خداوند جان و خرد

# کروماتوگراف گاز فرآیندی

## مبانی، طراحی و پیاده سازی

نویسنده تونی واترز

مترجم احسان توکلی

**مؤسسه آموزشی تألیفی ارشدان**

■ نام کتاب: **کروماتوگراف گاز فرآیندی (مبانی، طراحی، پیاده‌سازی)**

■ مترجم: **احسان توکلی**

■ ناشر: آموزشی تألیفی ارشدان

■ ویرایش: اول

■ نوبت چاپ: اول ۱۴۰۳

■ حروفچینی و صفحه آرایی: مجتبی قاسمی حامد

■ طراح و گرافیست: مجتبی قاسمی حامد

■ شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۰۹-۰۵۰۲-۸

■ شمارگان: ۱۰۰۰

■ مرکز خرید آنلاین: www.arshadan.com
www.arshadan.net

■ مرکز پخش و توزیع: ۰۲۱۴۷۶۲۵۵۰۰

■ قیمت: تومان

# پیشگفتار مترجم

کتاب حاضر با عنوان «کروماتوگراف گاز فرآیندی» یکی از منابع ارزشمند در حوزه آنالیز گازها یا مایعات فرار به روش کروماتوگرافی است که نقش مهمی در صنایع مختلف از جمله نفت، گاز و پتروشیمی دارد. این کتاب با رویکردی جامع و علمی، مفاهیم پایه‌ای و کاربردی این روش را به زبانی ساده و قابل‌فهم ارائه می‌دهد.

ایده ترجمه این کتاب زمانی شکل گرفت که پس از شرکت در دوره آموزشی نویسنده کتاب (Tony Waters) احساس کردم عدم وجود منابع فارسی در این زمینه باعث شده است متخصصان و کاربران دسترسی محدودی به دانش روز داشته باشند. هدف من از ترجمه این اثر، ایجاد پلی میان علم روز دنیا و نیازهای مهندسان و صنعتگران ایرانی بود.

فرآیند ترجمه این کتاب برای من تجربه‌ای پربار و درعین‌حال چالش‌برانگیز بود. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها، معادل‌سازی دقیق اصطلاحات تخصصی و انتقال مفاهیم علمی با حفظ امانت‌داری نسبت به متن اصلی بود. برای این منظور، از منابع معتبر علمی، مشاوره با اساتید و متخصصان حوزه کروماتوگرافی و همچنین تجربه‌های شخصی خود بهره گرفتم تا اطمینان حاصل کنم که محتوای کتاب با بالاترین دقت و کیفیت ممکن به خوانندگان ارائه شود.

یکی از ویژگی‌های برجسته این کتاب، رویکرد تلفیقی آن است که مفاهیم تئوری و کاربردی را به‌صورت همزمان بررسی می‌کند. نویسنده با زبانی ساده و شفاف، در سه بخش اصول اولیه کروماتوگراف گاز فرآیندی، سخت افزار داخلی و سیستم کنترل را توضیح داده‌است. این امر سبب می‌شود که کتاب حاضر هم برای تازه‌کاران و هم برای متخصصان باتجربه، مرجع ارزشمندی باشد.

در مسیر ترجمه این اثر، افراد زیادی همراه من بودند که بدون حمایت و همفکری آن‌ها، به سرانجام رساندن این پروژه ممکن نبود. در اینجا لازم می‌دانم از همکاران گرامی‌ام جناب آقای مهندس هاشمی و سرکار خانم مهندس فاطمه طایی در شرکت فنی مهندسی آمیتیس که با ارائه دیدگاه‌های تخصصی و نقدهای سازنده، نقشی مهم در بهبود کیفیت ترجمه داشتند، صمیمانه تشکر کنم. همچنین از خانواده عزیزم که در تمام مراحل کار، حامی و مشوق من بودند، سپاسگزاری می‌کنم.

از آنجا که هیچ اثری خالی از کاستی نیست و این کتاب نیز از این قاعده مستثنی نیست. از شما خوانندگان فرهیخته تقاضا دارم اگر در متن این اثر، اشکال، ایراد یا نکته‌ای قابل‌بهبود یافتید، یا پیشنهادی برای غنای هرچه بیشتر آن داشتید، لطف کنید و نظرات ارزشمند خود را از طریق آدرس ایمیل e.tavakoli@amitistech.com با اینجانب به اشتراک بگذارید. پیشنهادهای شما چراغ راهی برای بهبود و ارتقای این کتاب در ویرایش‌های آینده خواهد بود.

در نهایت، امیدوارم این ترجمه بتواند گامی هرچند کوچک در جهت ارتقای دانش و توانمندی‌های علمی و عملی خوانندگان گرامی باشد. از تمامی پژوهشگران، دانشجویان و صنعتگران دعوت می‌کنم که با دقت و علاقه به مطالعه این کتاب بپردازند و در راستای پیشرفت علمی و صنعتی کشورمان از آن بهره‌مند شوند.

با آرزوی موفقیت
احسان توکلی
دی ماه ۱۴۰۳

# فهرست

**بخش اول: مفاهیم پایه PGC / ... ۱**

۱-مقدمه / ... ۳
۱-۱ جداسازی کروماتوگرافی / ... ۳
۱-۲ کروماتوگراف گاز / ... ۷
۱-۲-۱ قسمت‌های اصلی / ... ۷
۱-۲-۲ آنالایزرهای صنعتی / ... ۸
۱-۳ گرم‌کن Oven / ... ۱۰
۱-۳-۱ کنترل دما / ... ۱۰
۱-۳-۲ برنامه‌ریزی دمایی Temperature Programming / ... ۱۱
۱-۴ شیر تزریق نمونه / ... ۱۱
۱-۴-۱ مدل آزمایشگاهی و آنلاین / ... ۱۱
۱-۴-۲ تزریق پلاگین Plug injection / ... ۱۲
۱-۴-۳ تزریق نمونه گاز / ... ۱۲
۱-۴-۴ تزریق نمونه مایع / ... ۱۳
۱-۵ ستون / ... ۱۴
۱-۵-۱ بخش جداساز / ... ۱۴
۱-۵-۲ زمان موردنیاز / ... ۱۴
۱-۵-۳ ستون‌های متعدد / ... ۱۵
۱-۶ انواع ستون / ... ۱۶
۱-۶-۱ ستون‌های آکنده / ... ۱۶
۱-۶-۲ ستون‌های لوله باز / ... ۱۷
۱-۷ آشکارساز / ... ۱۸
۱-۷-۱ انجام اندازه‌گیری‌ها / ... ۱۸
۱-۷-۲ کروماتوگرام / ... ۲۰
**۲- شکل پیک** / ... ۲۷
۲-۱ ستون‌ها چگونه کار می‌کنند / ... ۲۷
۲-۱-۱ چه اتفاقی در داخل ستون می‌افتد / ... ۲۸
۲-۱-۲ نحوه تعامل گاز و مایع / ... ۲۹
۲-۱-۳ نکات عیب‌یابی / ... ۳۱

۲-۲ پیک‌ها چگونه شکل می‌گیرند / ... ۳۲
۲-۲-۱ تشکیل یک تعادل / ... ۳۲
۲-۲-۲ اثر حرکت / ... ۳۴
۲-۲-۳ یک پیک ظاهر می‌شود / ... ۳۵
۲-۲-۴ اثر تعادل بیشتر / ... ۳۸
۲-۳ برخی از نتیجه‌گیری‌ها / ... ۳۹
۲-۳-۱ مولکول‌های یکسان – رفتار متفاوت / ... ۴۰
۲-۳-۲ همه پیک‌ها متقارن هستند / ... ۴۰
۲-۳-۳ تعادل بیشتر– پیک‌های باریک‌تر / ... ۴۰
۲-۳-۴ تعادل‌های بیشتر – پیک‌های بلندتر / ... ۴۱
۲-۳-۵ زمان ماند در رأس / ... ۴۱
۲-۳-۶ تعادل بیشتر – زمان ماند یکسان / ... ۴۱
۲-۴ انحلال‌پذیری/ ... ۴۲
۲-۴-۱ پارتیشن Partition / ... ۴۲
۲-۴-۲ توزیع / ... ۴۲
۲-۴-۳ محدودیت‌ها / ... ۴۲
**۳- جداسازی** / ... ۴۷
۳-۱ چگونه پیک‌ها از هم جدا می‌شوند / ... ۴۷
۳-۱-۱ توضیح واقعی‌تر / ... ۴۷
۳-۱-۲ یک سؤال چالشی / ... ۵۰
۳-۱-۳ اهمیت پیک هوا / ... ۵۱
۳-۱-۴ جواب / ... ۵۳
۳-۲ اندازه‌گیری از روی کروماتوگرام / ... ۵۵
۳-۲-۱ یک کار عملی / ... ۵۵
۳-۲-۲ محاسبات رایج / ... ۵۷
**۴-الگوهای پیک** / ... ۶۱
۴-۱ نرخ مهاجرت Migration Rate / ... ۶۱
۴-۲ الگوهای قابل‌پیش‌بینی در موقعیت پیک / ... ۶۱
۴-۲-۱ فضا یا زمان / ... ۶۱
۴-۲-۲ جداسازی مکانی یا زمانی / ... ۶۳
۴-۳ الگوهای قابل‌پیش‌بینی در عرض پیک / ... ۶۳
۴-۳-۱ فاصله یا مدت‌زمان / ... ۶۳
۴-۴ نام های شیمیایی / ... ۶۵

۴-۴-۱ هیدروکربن ها / ... ۶۵
۴-۴-۲ علامت اختصاری / ... ۶۶
۴-۵ الگوهای قابل‌پیش‌بینی در زمان ماند / ... ۶۷
۴-۵-۱ قانون دوبرابر شدن / ... ۶۷
۴-۵-۲ سؤال چالش‌برانگیز / ... ۶۸
۴-۵-۳ فرایند حذف / ... ۶۹
۴-۵-۴ برنامه‌ریزی دمایی / ... ۷۱
۴-۵-۵ زمان ماند نسبی Relative Retention / ... ۷۳
۴-۵-۶ جداسازی و تفکیک / ... ۷۵
۴-۵-۷ تفکیک‌پذیری Resolution / ... ۷۵
۴-۵-۸ الگوهای قابل‌پیش‌بینی در تفکیک‌پذیری / ... ۷۷

**بخش دوم: واحد آنالیز PGC / ... ۸۵**

**۵-کروماتوگراف گاز فرآیندی / ... ۹۰**
۵-۱ آنالایزرهای فرایند / ... ۹۰
۵-۱-۱ مقدمه‌ای بر آنالیز فرآیند / ... ۹۰
۵-۱-۲ اندازه‌گیری‌های کیفی / ... ۹۱
۵-۲ کروماتوگراف گاز فرآیندی / ... ۹۲
۵-۲-۱ همه‌کاره و قابل‌اعتماد / ... ۹۲
۵-۲-۲ توسعه PGC / ... ۹۳
۵-۲-۳ ارزش اندازه‌گیری‌های آنالایزر / ... ۹۵
۵-۳ فناوری‌های رقیب / ... ۹۶
۵-۳-۱ کروماتوگراف گاز یا طیف‌سنج فرایندی Spectrophotometer؟ / ... ۹۶
۵-۳-۲ سرعت پاسخ‌گویی / ... ۹۹
۵-۳-۳ چشم‌انداز / ... ۹۹
۵-۴ واحد آنالیز PGC / ... ۱۰۰
۵-۴-۱ مقدمه / ... ۱۰۰
۵-۴-۲ سیستم تأمین گاز حامل / ... ۱۰۱
۵-۴-۳ سیستم تزریق نمونه / ... ۱۰۱
۵-۴-۴ شیرهای کروماتوگراف / ... ۱۰۱
۵-۴-۵ سیستم ستونی / ... ۱۰۲
۵-۴-۶ آشکارسازها / ... ۱۰۳
۵-۴-۷ گرم‌کن با دمای کنترل‌شده / ... ۱۰۳

**۶- سیستم گاز حامل** / ... ۱۰۹
۶-۱ انتخاب گاز حامل / ... ۱۰۹
۶-۱-۱ هدف گاز حامل / ... ۱۰۹
۶-۱-۲ انتخاب گاز حامل / ... ۱۰۹
۶-۱-۳ گازهای حامل مخلوط / ... ۱۱۱
۶-۲ خلوص گاز حامل / ... ۱۱۲
۶-۲-۱ اثر ناخالصی‌ها بر آنالیز / ... ۱۱۳
۶-۲-۲ اثر مخرب ناخالصی‌ها / ... ۱۱۵
۶-۲-۳ تعمیر و نگهداری پاک‌کننده‌های گاز / ... ۱۱۷
۶-۳ سیستم تأمین گاز حامل / ... ۱۱۷
۶-۳-۱ خط تأمین گاز حامل / ... ۱۱۹
۶-۴ تنظیم فشار / ... ۱۲۰
۶-۴-۱ رگلاتور فشار مکانیکی / ... ۱۲۰
۶-۴-۲ کنترل‌کننده‌های الکترونیکی فشار / ... ۱۲۰
۶-۵ تنظیم دبی / ... ۱۲۱
۶-۵-۱ اندازه‌گیری نرخ دبی گاز حامل / ... ۱۲۱
۶-۵-۲ تنظیم نرخ دبی / ... ۱۲۲
۶-۵-۳ نرخ دبی بهینه / ... ۱۲۳
**۷- تزریق نمونه** / ... ۱۲۷
۷-۱ مقدمه / ... ۱۲۷
۷-۲ تزریق نمونه گاز / ... ۱۲۸
۷-۲-۱ حجم نمونه گاز / ... ۱۲۸
۷-۲-۲ دمای نمونه گاز / ... ۱۳۰
۷-۲-۳ فشار گاز نمونه / ... ۱۳۲
۷-۳ تزریق نمونه‌های مایع / ... ۱۳۳
۷-۳-۱ تبخیر نمونه مایع / ... ۱۳۴
۷-۳-۲ حجم نمونه مایع / ... ۱۳۵
۷-۳-۳ دمای نمونه مایع / ... ۱۳۶
۷-۳-۴ فشار نمونه مایع / ... ۱۳۸
۷-۴ سایر روش‌ها / ... ۱۳۹
۷-۴-۱ تقسیم نمونه / ... ۱۳۹
۷-۴-۲ تزریق نمونه از راه دور / ... ۱۳۹
۷-۴-۳ نرمال‌سازی / ... ۱۴۰

۷-۵ در مورد واحدهای اندازه‌گیری آنالایزر / ... ۱۴۱
۷-۵-۱ یک مثال / ... ۱۴۱
۷-۵-۲ حجم نمونه ثابت / ... ۱۴۱
۷-۵-۳ واحدهای نسبت متفاوت / ... ۱۴۲
۷-۵-۴ مقدار تزریق‌شده / ... ۱۴۳
۷-۵-۵ تبدیل واحدها / ... ۱۴۴
**۸-شیرهای کروماتوگراف** / ... ۱۵۱
۸-۱ تکنولوژی شیر / ... ۱۵۱
۸-۱-۱ سیر تکاملی / ... ۱۵۱
۸-۲ تأثیر عجیب رقابت / ... ۱۵۳
۸-۳ انواع شیر / ... ۱۵۴
۸-۳-۱شیرهای سلنوییدیSolenoid Valves / ... ۱۵۴
۸-۳-۲ شیرهای قرقره‌ای یا پیستونی / ... ۱۵۴
۸-۳-۳ شیرهای کشویی / ... ۱۵۵
۸-۳-۴ شیرهای چرخشی / ... ۱۵۹
۸-۳-۵ شیرهای دیافراگمی / ... ۱۶۳
۸-۳-۶ شیرهای پلانگر برای تزریق نمونه مایع / ... ۱۶۶
۸-۳-۷ سایر روش‌های سوئیچینگ / ... ۱۶۸
۸-۴ نشتی شیر / ... ۱۶۹
۸-۴-۱ در مورد نشتی / ... ۱۶۹
۸-۵ کاهش نشتی شیر / ... ۱۷۲
**۹- پیکربندی‌های ستون** / ... ۱۷۹
۹-۱ دو موضوع اساسی / ... ۱۷۹
۹-۱-۱ مشکل پاکسازی Elution Problem / ... ۱۷۹
۹-۲ راه حل افزایش دما / ... ۱۸۱
۹-۳ راه حل ستون‌های چندگانه / ... ۱۸۲
۹-۴ انتخاب / ... ۱۸۳
۹-۵ تزریق نمونه با تأخیر / ... ۱۸۴
۹-۶ انواع پیکربندی ستون / ... ۱۸۵
۹-۶-۱ شناخت عملکردها / ... ۱۸۵
۹-۷ نوع A: تک‌ستونی / ... ۱۸۶
۹-۸ نوع B: ستون‌های متعدد، آشکارساز واحد / ... ۱۸۷
۹-۹ نوع C: آشکارسازهای چندگانه، با یک شیر تزریق نمونه / ... ۱۸۸

۹-۱۰ نوع D: شیرهای تزریق نمونه چندگانه / ... ۱۹۰
۹-۱۱ پیکربندی‌های ستون پایه / ... ۱۹۲
۹-۱۱-۱ روش‌های مفید / ... ۱۹۲
۹-۱۲ سیستم ستون Backflush / ... ۱۹۳
۹-۱۳ سیستم ستون توزیع / ... ۱۹۶
۹-۱۴ سیستم ستون Heartcut / ... ۱۹۷
۹-۱۴-۱ سیستم ستون به دام انداختن و نگه‌داشتن / ... ۱۹۹
۹-۱۵ قدرت واقعی / ... ۲۰۱
۹-۱۶ پی‌نوشت / ... ۲۰۲
**۱۰- آشکارسازها** / ... ۲۰۹
۱۰-۱ مقدمه / ... ۲۰۹
۱۰-۲ انواع آشکارساز / ... ۲۱۰
۱۰-۲-۱ دو متغیر قابل‌اندازه‌گیری / ... ۲۱۰
۱۰-۲-۲ آشکارسازهای غلظت / ... ۲۱۰
۱۰-۲-۳ آشکارسازهای متناسب با نرخ ورود آنالیت / ... ۲۱۱
۱۰-۲-۴ آشکارسازهای چندگانه / ... ۲۱۲
۱۰-۲-۵ دریافت سیگنال / ... ۲۱۳
۱۰-۳ در رابطه با آشکارسازها / ... ۲۱۳
۱۰-۳-۱ نویز سیگنال / ... ۲۱۴
۱۰-۳-۲ سرعت پاسخ‌گویی / ... ۲۱۵
۱۰-۳-۳ حساسیت / ... ۲۱۶
۱۰-۴ آشکارساز هدایت حرارتی / ... ۲۱۹
۱۰-۴-۱ کاربردهای TCD / ... ۲۱۹
۱۰-۴-۲ عملکرد اصلی TCD / ... ۲۲۰
۱۰-۴-۳ اصول کار TCD / ... ۲۲۰
۱۰-۴-۴ عنصر حرارتی TCD / ... ۲۲۳
۱۰-۴-۵ چیدمان الکتریکی TCD / ... ۲۲۴
۱۰-۴-۶ پیشرفت‌های الکتریکی TCD / ... ۲۲۵
۱۰-۴-۷ افزایش عملکرد TCD / ... ۲۲۷
۱۰-۵ آشکارساز یونیزاسیون شعله / ... ۲۳۰
۱۰-۵-۱ کاربردهای FID / ... ۲۳۰
۱۰-۵-۲ اصول کار FID / ... ۲۳۱
۱۰-۵-۳ گازهای جبرانی FID Makeup / ... ۲۳۲

۱۰-۵-۴ حساسیت FID / ... ۲۳۳
۱۰-۵-۵ تنظیمات خروجیFID / ... ۲۳۴
۱۰-۵-۶ متاناتور Methanator FID / ... ۲۳۴
۱۰-۶ آشکارساز فتومتریک شعله / ... ۲۳۵
۱۰-۶-۱ کاربردهای FPD / ... ۲۳۵
۱۰-۶-۲ اصول کار FPD / ... ۲۳۸
۱۰-۶-۳ مشکلات FPD / ... ۲۳۹
۱۰-۷ آشکارسازهای دیگر/ ... ۲۴۰
۱۰-۷-۱ آشکارساز جذب الکترون Electron Capture Detector / ... ۲۴۲
۱۰-۷-۲ آشکارساز یونیزاسیون هلیوم Helium Ionization Detector / ... ۲۴۳
۱۰-۷-۳ آشکارساز فوتیونیزاسیون Photoionization Detector / ... ۲۴۴
۱۰-۷-۴ آشکارساز تخلیه پالسی Pulsed Discharge Detector / ... ۲۴۵
**۱۱- کنتـرل دما** / ... ۲۵۷
۱۱-۱ نیاز به ثبات / ... ۲۵۷
۱۱-۱-۱ حجم نمونه / ... ۲۵۷
۱۱-۱-۲ زمان ماند / ... ۲۵۸
۱۱-۱-۳ خط پایه آشکارساز/ ... ۲۵۸
۱۱-۲ روش گرمایش / ... ۲۵۹
۱۱-۳ گرم‌کن حمام هوا / ... ۲۶۰
۱۱-۳-۱ گرمایش با تصفیه هوا / ... ۲۶۰
۱۱-۴ گرم‌کن بدون هوا / ... ۲۶۳
۱۱-۴-۱ گرمایش بدون هوا / ... ۲۶۳
۱۱-۴-۲ مدلPGC1000 ساخت ABB سال ۲۰۰۸ / ... ۲۶۶
۱۱-۴-۳ مدل Danalyzer 370XA ساخت Rosemount سال ۲۰۱۴ / ... ۲۶۷
۱۱-۴-۴ مدل XA۷۰۰ ساخت Rosemount سال ۲۰۰۹ / ... ۲۶۸
۱۱-۴-۵ مدلMaxum Edition II ساخت Siemens سال ۲۰۰۲ / ... ۲۶۸
۱۱-۵ گرمایش مستقیم ستون / ... ۲۶۹
۱۱-۵-۱ گرمایش مقاومتی / ... ۲۶۹
۱۱-۵-۲ رویکرد ABB / ... ۲۷۰
۱۱-۵-۳ رویکرد Teledyne Falcon / ... ۲۷۲
۱۱-۵-۴ هشدارها / ... ۲۷۳
۱۱-۵-۵ خلاصه روش‌های گرمایش / ... ۲۷۴
۱۱-۶ استانداردسازی PGC / ... ۲۷۵

۱۱-۶-۱ واقعیت‌های بازار / ... ۲۷۵
۱۱-۶-۲ مسئله مهندسی برنامه‌های کاربردی / ... ۲۷۵
۱۱-۶-۳ فناوری MEMS / ... ۲۷۶
۱۱-۶-۴ زیمنس MicroSAM 2002 / ... ۲۷۶
۱۱-۷ جمع‌بندی / ... ۲۷۷

**بخش سوم: واحد کنترل PGC / ... ۲۸۳**

۱۲- برنامه‌ریزی رخدادها / ... ۲۸۷
۱۲-۱ دنباله‌ای از اقدامات / ... ۲۸۷
۱۲-۱-۱ زمان‌بندی برنامه / ... ۲۸۷
۱۲-۱-۲ تنظیم خودکار صفر Autozero / ... ۲۹۰
۱۲-۱-۳ ارجاع به اتمسفر / ... ۲۹۰
۱۲-۱-۴ تزریق نمونه / ... ۲۹۱
۱۲-۱-۵ انتخاب مسیر جریان ورودی / ... ۲۹۲
۱۲-۱-۶ تعویض ستون / ... ۲۹۳
۱۲-۱-۷ گیت پیک Peak gating / ... ۲۹۳
۱۲-۱-۸ آغاز محاسبات / ... ۲۹۴
۱۲-۱-۹ انتقال داده / ... ۲۹۴
۱۲-۱-۱۰ آلارم‌های هشدار / ... ۲۹۴
۱۲-۱-۱۱ پایان چرخه / ... ۲۹۴
۱۲-۱-۱۲ نشانگرهای رخداد / ... ۲۹۴
۱۲-۱-۱۳ رخدادهای تقویمی / ... ۲۹۵
۱۲-۲ مکانیسم‌های زمان‌بندی / ... ۲۹۵
۱۲-۲-۱ برنامه‌ریزهای مکانیکی / ... ۲۹۵
۱۲-۲-۲ تایمرهای الکترونیکی / ... ۲۹۵
۱۲-۲-۳ کنترل مبتنی بر ریزپردازنده / ... ۲۹۶
۱۲-۲-۴ برنامه یا متد / ... ۲۹۷
۱۲-۳ کنترل عملکرد آنالایزر / ... ۲۹۸
۱۲-۳-۱ کنترل دما / ... ۲۹۸
۱۲-۳-۲ کنترل فشار / ... ۲۹۸
۱۲-۴ شناسایی پیک / ... ۲۹۹
۱۲-۴-۱ گیت با زمان ثابت / ... ۲۹۹
۱۲-۴-۲ ردیابی زمان ماند / ... ۳۰۱

**۱۳- روش‌های نمایش داده** / ... ۳۰۷
۱۳-۱ نمایشگر کروماتوگرام / ... ۳۰۷
۱۳-۱-۱ سیگنال آشکارساز / ... ۳۰۷
۱۳-۱-۲ کروماتوگرام‌های دیجیتالی / ... ۳۰۸
۱۳-۱-۳ تنظیم خودکار صفر کروماتوگرام Autozero / ... ۳۱۰
۱۳-۱-۴ کالیبراسیون ارتفاع پیک / ... ۳۱۱
۱۳-۱-۵ کالیبراسیون مساحت پیک / ... ۳۱۲
۱۳-۲ نمایش نمودار میله‌ای / ... ۳۱۳
۱۳-۲-۱ صرفه‌جویی در کاغذ / ... ۳۱۳
۱۳-۳ The Trend Record / ... ۳۱۴
۱۳-۳-۱ پردازش پیک آنالوگ / ... ۳۱۴
۱۳-۴ پردازش سیگنال دیجیتال / ... ۳۱۶
۱۳-۴-۱ مینی کامپیوتر / ... ۳۱۶
۱۳-۴-۲ ریزپردازنده همه‌جا حاضر / ... ۳۱۷
۱۳-۴-۳ شاید یک بازگشت به عقب؟ / ... ۳۱۹
۱۳-۴-۴ ایستگاه تعمیر و نگهداری مرکزی / ... ۳۲۰
۱۳-۴-۵ کنترل‌کننده‌های آنالایزر پیوسته / ... ۳۲۱
۱۳-۵ آلارم‌های عملکرد PGC / ... ۳۲۲
۱۳-۵-۱ شاخص‌ها / ... ۳۲۲
۱۳-۵-۲ اعلان‌های هشدار / ... ۳۲۲
**۱۴- محاسبه مساحت پیک** / ... ۳۲۹
۱۴-۱ پردازش دیجیتالی کروماتوگرام / ... ۳۲۹
۱۴-۱-۱ دیجیتالی شدن فرکانس پالس / ... ۳۲۹
۱۴-۱-۲ اندازه‌گیری نویز سیگنال / ... ۳۳۱
۱۴-۱-۳ کاهش نویز سیگنال / ... ۳۳۲
۱۴-۲ کمی کردن پیک‌های آنالیت / ... ۳۳۵
۱۴-۲-۱ محاسبه زمان‌بندی‌شده / ... ۳۳۶
۱۴-۲-۲ تشخیص شیب / ... ۳۳۸
۱۴-۲-۳ خطاهای ناشی از اختلالات خط پایه / ... ۳۳۹
۱۴-۲-۴ کمک‌های عیب‌یابی / ... ۳۴۰
۱۴-۳ اندازه گیری پیک‌های با همپوشانی / ... ۳۴۱
۱۴-۳-۱ جلوگیری از مشکل / ... ۳۴۱
۱۴-۳-۲ مقابله با مشکل / ... ۳۴۲

۱۴-۳-۳ روش افت عمودی / ... ۳۴۳
۱۴-۳-۴ با یک نقطه دره محاسبه انجام ندهید / ... ۳۴۵
۱۴-۳-۵ افت زاویه‌ای یا مساحت اختصاص داده شده / ... ۳۴۶
۱۴-۳-۶ روش تانژانت‌اسکیم Tangent Skim / ... ۳۴۷
۱۴-۳-۷ تأثیر اشتباهات راه‌اندازی / ... ۳۴۹
**۱۵- کالیبراسیون** / ... ۳۵۵
۱۵-۱ اصول اندازه‌گیری / ... ۳۵۵
۱۵-۱-۱ واژه شناسی / ... ۳۵۵
۱۵-۱-۲ خطای تصادفی / ... ۳۵۶
۱۵-۱-۳ خطای سیستماتیک / ... ۳۵۷
۱۵-۱-۴ عدم قطعیت Uncertainty / ... ۳۵۷
۱۵-۱-۵ کالیبراسیون صحیح / ... ۳۵۹
۱۵-۱-۶ کالیبراسیون و اعتبارسنجی / ... ۳۶۰
۱۵-۲ روش‌های کالیبراسیون / ... ۳۶۲
۱۵-۲-۱ روش استاندارد خارجی / ... ۳۶۲
۱۵-۲-۲ نرمال‌سازی / ... ۳۶۳
۱۵-۲-۳ کالیبره کردن یک پیک مرکب / ... ۳۶۵
۱۵-۲-۴ کالیبراسیون نمونه Grab / ... ۳۶۶
۱۵-۲-۵ روش استاندارد داخلی / ... ۳۶۷
۱۵-۲-۶ روش درصد مساحت / ... ۳۶۸
۱۵-۳ در مورد عوامل پاسخ / ... ۳۶۸
۱۵-۳-۱ استاندارد خارجی / ... ۳۶۸
۱۵-۳-۲ نرمال‌سازی / ... ۳۷۰
۱۵-۳-۳ استاندارد داخلی / ... ۳۷۰
۱۵-۳-۴ درصد مساحت / ... ۳۷۱
**واژه نامه** / ... **۳۷۵**

# پیشگفتار

این کتاب بر روی کروماتوگراف گاز فرایندی (PGC) تمرکز دارد. دهها کتاب خوب در مورد علم کروماتوگرافی گازی وجود دارد، اما کتاب‌های کمی در مورد فناوری کروماتوگراف گاز فرایندی نوشته شده است. تا قبل از این فقط دو کتاب به کروماتوگراف گاز آنلاین صنعتی اختصاص یافته بود (Huskins 1977; Annino and Villalobos 1992).

کروماتوگراف‌های گاز صنعتی ابزار پیچیده‌ای هستند و افرادی که آن‌ها را طراحی و کاربری می‌کنند به دانش ویژه و مهارت‌های منحصربه‌فرد نیاز دارند. این کتاب برای رفع نیازهای تکنسین آنالایزر، مهندس ابزاردقیق فرایند و متخصص آنالایزر فرآیند نوشته شده است.

PGC یک فناوری کاربردی است و این کتاب نیز کاربردی است. این کتاب راهنمای آموزشی مناسب برای کسانی است که در حال حاضر این تخصص را یاد می‌گیرند و یک راهنمای مرجع مفید برای افراد شاغلی است که در حال کار با کروماتوگراف گاز هستند.

فصل‌های این کتاب عمدا فشرده هستند و برای یک برنامه مطالعه هفتگی یا به عنوان درس‌های متمرکز در یک دوره آموزشی، مناسب هستند. هر فصل با خلاصه‌ای از آنچه در آن فصل آموخته شد، به پایان می‌رسد.

هر کسی که در صنایع فرآوری سیال کار می‌کند، می‌داند که پایگاه دانش آن‌ها در حال از بین رفتن است. به دلیل کاهش پرسنل و بازنشستگی انبوه، صنعت ما چندین دهه تجربه سخت به دست آمده را از دست می‌دهد.

Walter Jennings و Colin Poole اخیراً این وضعیت را به خوبی بیان کرده‌اند (Jennings and Poole 2012, 72):

> *این [اتوماسیون کروماتوگراف‌های گاز] منجر به کاهش مداوم تخصص کارشناسان کروماتوگراف از اواسط دهه ۱۹۸۰ تا کنون شده است. این مسئله می‌تواند خطرناک باشد، زیرا همه چیز از انتخاب ستون تا مهارت‌های عیب‌یابی مبتنی بر دانش اساسی از اصول کروماتوگرافی است که فقدان آن کیفیت و سودمندی اطلاعات به دست آمده توسط این ابزارها را کاهش می‌دهد. برای رسیدگی به این مشکلات، قبل از اینکه این دانش از بین برود و سودمندی کروماتوگراف گاز برای تصمیم گیرندگان زیر سوال برود، به یک تلاش آموزشی گسترده نیاز است.*

هیچ دلیل واضح‌تری برای توجیه نوشتن این کتاب وجود ندارد. در حالی که نویسندگان برای شیمیدانان آزمایشگاهی کتاب‌های مناسب می‌نویسند، کسانی که روی کروماتوگراف‌های صنعتی کار می‌کنند نیز نیاز به ارائه دانش بنیادی از اصول کروماتوگرافی به گونه‌ای دارند که یک دوره آموزشی گسترده را تسهیل کند. این کتاب درسی برای برآوردن این نیازها تنظیم شده است. کتاب در درجه اول برای مهندسان و تکنسین‌های آنالایزر فرآیند نوشته شده است، اما برای هر کسی که از کروماتوگراف گاز فرایندی استفاده می‌کند یا نگهداری می‌کند مفید می‌باشد.

این متن دانش بنیادی کروماتوگراف گاز فرایندی را با تشویق خواننده به تفکر انتقادی در مورد آنچه در دستگاه اتفاق می‌افتد، عمدتاً بدون توسل به قیاس یا ریاضیات، آموزش می‌دهد. همچنین برخی از روش‌های عملی برای طراحی یا عیب یابی را شرح می‌دهد.

# بخش اول

## مفاهیم پایه PGC

**شکل ۱-۱ کروماتوگراف گاز فرایندی کلاسیک. منبع: Beckman Historical.**
کروماتوگراف اندازه-گیری کیفیت هوا مدل 6800 ساخت Beckman سال ۱۹۷۵

ما نمی توانیم چیزی به مردم بیاموزیم; ما فقط می توانیم به آنها کمک کنیم تا آن را در درون خود کشف کنند

*منسوب به گالیلئو گالیله ۱۶۴۲-۱۵۶۴*

### ❖ چرا باید این فصل را مطالعه کنید!؟

بخش اول این کتاب روش کروماتوگرافی گاز (GC[1]) را که در آنالیز فرایندهای صنعتی اعمال می‌شود، معرفی می‌کند.

این چهار فصل توضیح می‌دهد که ستون Column در کروماتوگرافی گاز چگونه کار می‌کند، چرا ترکیبات موجود در نمونه تزریق شده شکل پیک (Peak) مشخصه را تشکیل می‌دهند، چگونه یک پیک از پیک دیگر جدا می‌شود و چگونه می‌توانیم موقعیت و شکل پیک‌ها را در کروماتوگرام از روی زمان‌بندی و عرض پیک الگوهای شناخته شده پیش‌بینی کنیم.

این کتاب، اطلاعات را به روشی آسان و عمدتاً غیر ریاضی ارائه می‌دهد. به منظور جلوگیری از گمراهی خواننده، از بیان تشبیهات ساده از آنچه که در داخل ستون GC اتفاق می‌افتد اجتناب شده است. در عوض، بینشی چالش‌برانگیز از رفتار کروماتوگرافی واقعی ارائه می‌شود.

دانش به‌دست آمده در این بخش آمادگی لازم را برای درک عملکرد دستگاه‌های سخت‌افزاری و روش‌های نرم‌افزاری که در فصل‌های بعدی کتاب معرفی شده‌اند ایجاد می‌کند. تسلط بر این مفاهیم برای کسانی که می‌خواهند در کاربری یا عیب‌یابی کروماتوگراف های گاز صنعتی مهارت داشته‌باشند، بسیار مهم است.

---

[1] Gas Chromatography

# ۱

# مقدمه

*کتاب‌های مربوط به کروماتوگرافی گاز که تعداد زیادی از آنها وجود دارد، معمولاً با مرور تاریخچه ساخت کروماتوگراف شروع می‌شوند، بنابراین ما در این کتاب از این بخش صرف‌نظر می‌کنیم. در عوض، ما با درک روش اصلی شروع می‌کنیم: کروماتوگراف چه کاری انجام می‌دهد و چگونه آن را انجام می‌دهد؟ برای خواندن تاریخچه شگفت‌انگیز علم کروماتوگرافی، به کتاب (Ettre 2008) مراجعه کنید.*

## ۱-۱ جداسازی کروماتوگرافی

بیایید با نگاهی کوتاه به اشکال مختلف کروماتوگرافی شروع کنیم. کروماتوگرافی به‌خودی‌خود یک روش آنالیز کامل نیست. این روش فقط راهی برای جداکردن یک نوع مولکول از نوع دیگری از مولکول است. دلیل جداسازی مولکول‌ها اندازه‌گیری آن‌ها به‌تنهایی و بدون دخالت مولکول‌های دیگر است. این جداسازی و اندازه‌گیری استفاده آنالیزی از کروماتوگرافی است.

درحالی‌که اندازه‌گیری به عنوان آنالیز دلیل اصلی استفاده از کروماتوگرافی است، تنها دلیل استفاده از آن نیست. برخی از فرایندها در مقیاس آزمایشگاهی و مقیاس صنعتی از جداسازی کروماتوگرافی برای جداسازی دسته‌های بسیار خالص از مواد شیمیایی با ارزش استفاده می‌کنند. این استفاده به‌عنوان کروماتوگرافی آماده‌سازی (Preparative Chromatography) شناخته می‌شود و با مقادیر بسیار بیشتری از مواد نسبت به

کروماتوگرافی آنالیزی کار می‌کند. این کتاب بر آنالیز تمرکز دارد، بنابراین استفاده به‌منظور آماده‌سازی از کروماتوگرافی را مورد بحث قرار نمی‌دهد.

هنگامی که کروماتوگرافی به‌عنوان بخشی از یک روش آنالیز استفاده می‌شود، یک روش بسیار مؤثر برای جداسازی ترکیبات از یکدیگر و از سایر ترکیبات شیمیایی موجود در مواد مورد آنالیز است. پس از جداسازی تمام ترکیبات موردنظر، بخش دیگری هر ترکیب را به‌طور مستقل اندازه‌گیری می‌کند.

بنابراین به‌خاطر داشته‌باشید که آنالیز کروماتوگرافی همیشه یک فرایند دومرحله‌ای شامل جداسازی و سپس اندازه‌گیری می‌باشد.

راه‌های زیادی برای جداسازی کروماتوگرافی وجود دارد و همه ترکیب‌های ممکن از گازها، مایعات و جامدات را شامل می‌شود. این اشکال مختلف کروماتوگرافی درحالی‌که در عمل کاملاً متفاوت هستند، دارای ویژگی‌های مشترکی هستند. جداسازی در تمام کروماتوگرافی‌های کاربردی شامل حرکت یک ماده سیال از روی سطح یک ماده ثابت می‌باشد.

در اصطلاح رسمی کروماتوگرافی به ماده متحرک، فاز متحرک (Mobile Phase) و به ماده غیر متحرک، فاز ساکن (Stationary Phase) گفته‌می‌شود.

فاز متحرک ممکن است یک گاز یا یک مایع باشد که ما باتوجه‌به آن اصطلاحات زیر را تعریف می‌کنیم:

- کروماتوگرافی گاز (Gas Chromatography)، که در آن فاز متحرک یک گاز است.
- کروماتوگرافی مایع (Liquid Chromatography)، که در آن فاز متحرک مایع است.

در تعداد کمی از کاربردها از یک سیال فوق بحرانی (Supercritical Fluid) به‌عنوان فاز متحرک استفاده می‌شود. این کتاب در مورداستفاده آنالیزی از کروماتوگرافی گاز برای اندازه‌گیری آنلاین در فرایندهای صنعتی است و در مورد کروماتوگرافی مایع بحث نخواهیم کرد. در کروماتوگرافی گاز، فاز متحرک همیشه گاز است و معمولاً آن را گاز حامل (Carrier Gas) می‌نامند. گاز حامل درون یک لوله طولانی باریک به نام ستون کروماتوگرافی که شامل فاز ساکن است، جریان می‌یابد. فاز ساکن ممکن است یک جامد جاذب (Adsorbent Solid) یا یک مایع غیرفرار (Non-volatile Liquid) باشد. بعداً بیشتر در مورد آن صحبت می‌کنیم.

## ۱-۲ کروماتوگراف گاز

### ۱-۲-۱ قسمت‌های اصلی

کروماتوگراف گاز یک آنالایزر است که از روش‌های کروماتوگرافی گاز برای اندازه‌گیری غلظت ترکیبات شیمیایی انتخاب شده در یک نمونه کوچک (حاوی مخلوطی از ترکیبات) استفاده می‌کند.

در کروماتوگراف گاز، فاز متحرک یک نوع گاز است که به‌دقت متناسب با آن کاربرد خاص انتخاب شده‌است. فاز متحرک معمولاً هیدروژن، هلیوم یا نیتروژن است، اما هر گازی که با اجزای نمونه یا مواد ستون واکنش نشان ندهد می‌تواند به‌عنوان گاز حامل انتخاب شود. گاز حامل نباید حاوی اکسیژن یا بخار آب باشد، زیرا این مواد ممکن است به ستون‌ها آسیب برساند.

فشار گاز حامل به‌دقت و پیوسته کنترل می‌شود و پس از آن به‌طور مداوم در ستون جریان دارد.

سیال مورد آنالیز می‌تواند به شکل گاز یا مایع فرار (Volatile Liquid) باشد. یک شیر مخصوص، حجم کمی از آن مایع را به گاز حامل جاری تزریق می‌کند. نمونه مایع معمولاً بلافاصله پس از تزریق تبخیر می‌شود، بنابراین تا زمانی که به ستون برسد، به‌طور کامل بخار شده‌است.

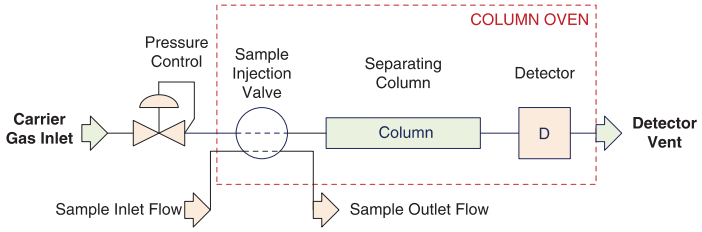
*توجه داشته‌باشید که وقتی کروماتوگراف گاز نمونه مایع را می‌پذیرد، به کروماتوگراف مایع تبدیل نمی‌شود. کروماتوگراف مایع یک ابزار کاملاً متفاوت است که از فاز متحرک مایع استفاده می‌کند و اجزای فاز مایع را جدا می‌کند. کروماتوگراف‌های مایع به‌ندرت به‌عنوان آنالایزر آنلاین صنعتی استفاده می‌شوند و در این کتاب مورد بحث قرار نمی‌گیرند.*

پس از تزریق، گاز حامل نمونه گاز یا بخار را به ستون می‌برد، جایی که با فاز ساکن تماس پیدا می‌کند. این تماس با فاز ساکن است که جداسازی (Separation) موردنظر را انجام می‌دهد.

استفاده از کلمه جزء (Component) برای یک ماده شیمیایی یا گروهی از مواد شیمیایی موجود در نمونه مرسوم است. کروماتوگراف گاز ممکن است همه اجزا را اندازه نگیرد، اما هر جزء اندازه‌گیری شده یک آنالیت (Analyte) نامیده می‌شود.

کروماتوگراف گاز می‌تواند یک، چند یا همه اجزای یک نمونه گاز یا مایع فرار را جدا و اندازه‌گیری کند.

پس از جداسازی، گاز حامل اجزا را به یک آشکارساز (Detector) می‌برد که سیگنال قابل اندازه‌گیری را به مدارهای پردازش‌داده ارائه می‌دهد.




**شکل ۱-۲ قسمت‌های اصلی کروماتوگراف گاز:** هنگامی که شیر تزریق نمونه فعال می‌شود، مقدار کمی از نمونه را به گاز حامل در حال جریان منتقل می‌کند. فصل‌های بعدی جزئیات کاملی از انواع مختلف شیر تزریق نمونه (Injector) مورد استفاده در کروماتوگراف گاز فرایندی ارائه می‌دهند.

شکل ۱-۲ دستگاه‌های سخت‌افزاری اصلی موجود در هر کروماتوگراف گاز را معرفی می‌کند:

- گرم‌کن ستون با یک یا چند ناحیه دمایی تحت‌کنترل.
- تأمین گاز حامل و سیستم کنترل فشار.
- شیر تزریق نمونه برای تزریق حجم قابل تکرار نمونه به گاز حامل.
- یک یا چند ستون جداساز.
- یک یا چند آشکارساز.

همه کروماتوگراف‌های گاز این عملکردهای اساسی را دارند، بااین‌حال ما شاهد تنوع زیادی در طراحی و ساخت آن‌ها هستیم.

### ۱-۲-۲ آنالایزرهای صنعتی

توسعه اولیه کروماتوگراف گاز غیرعادی بود. پس از اختراع این روش در سال ۱۹۵۲، شرکت‌های نفتی و تولیدکنندگان مواد شیمیایی خیلی سریع به پتانسیل آن برای کنترل فرایند پی‌بردند و در ادامه شرکت‌های سازنده تجهیزات کارهای تکمیلی را انجام دادند.

در نتیجه نحوه تکامل کروماتوگراف‌های گاز که برای نظارت و کنترل فرایندهای صنعتی در نظر گرفته شده‌بودند با مدل‌هایی که برای استفاده آزمایشگاهی در نظر گرفته شده‌بودند، متفاوت بود. اگرچه هر دو نوع از یک فناوری اصلی استفاده می‌کنند، حوزه کاربرد آنها کاملاً متفاوت است.

*به‌عنوان مثال، یک کروماتوگراف گاز فرایندی که آنالیز را در دو دقیقه انجام می‌دهد، روزانه ۷۲۰ نمونه دریافت می‌کند. درحالی‌که کروماتوگراف آزمایشگاهی ممکن است فقط سه نمونه در روز دریافت کند.*

بنابراین، مشخصات طراحی یک کروماتوگراف گاز نصب شده در یک کارخانه صنعتی کاملاً متفاوت از یک کروماتوگراف گاز است که روی یک میز آزمایشگاهی قرار دارد. دلایل اصلی این تفاوت‌ها عبارت‌اند از:

- کروماتوگراف‌های صنعتی در یک محیط بالقوه گرم، سرد، دارای گردوغبار، دارای رطوبت، دارای باد، در حضور مواد خورنده یا خطرناک کار می‌کند.
- کروماتوگراف‌های صنعتی به‌طور مداوم بیست و چهار ساعت در روز و هفت روز در هفته کار می‌کند.
- کروماتوگراف‌های صنعتی باید تقریباً بدون دخالت نیروی انسانی قابل‌اطمینان عمل کند. شاید فقط یک بررسی کالیبراسیون در هر ماه لازم باشد.
- کروماتوگراف‌های صنعتی می‌توانند فقط بر اندازه‌گیری تنها تعداد کمی از اجزای یک نمونه (اجزای موردنیاز برای کنترل فرایند) تمرکز کنند.
- کاهش زمان آنالیز برای کروماتوگراف‌های صنعتی بسیار مهم است، بنابراین اندازه‌گیری‌های آن برای کنترل فرایند معتبر است.

به‌دلایل فوق، یک کروماتوگراف صنعتی (PGC[۲]) ممکن است شامل تجهیزاتی باشد که در شکل ۱-۲ نشان داده نشده است. در فصل‌های بعدی بیشتر درباره این تجهیزات بحث خواهد شد. به‌عنوان نمونه:

- سیستم آماده‌سازی نمونه (Sampling Conditioning) که خارج از کروماتوگراف برای آماده‌سازی نمونه ورودی فرایند به‌منظور سازگاری با کروماتوگراف قرار گرفته است.
- ستون‌های متعدد با شیرهای ویژه برای جابه‌جایی مولکول‌های آنالیت از یک ستون به ستون دیگر، در نتیجه سرعت رسیدن اجزای جدا شده به آشکارساز را به حداکثر می‌رساند. این یک پیچیدگی اضافی است که به‌ندرت در ابزارهای آزمایشگاهی یافت می‌شود.

---

[۲] Process Gas Chromatograph