

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کاربرد آمار و طراحی آزمایش‌ها در رشته‌های علوم و مهندسی

تألیف

دکتر شهره فاطمی

(استاد مهندسی شیمی دانشکده فنی دانشگاه تهران)

مأده سلماسی



شماره مسلسل ۸۹۴۴

شماره انتشار ۳۷۷۹

انتشارات دانشگاه تهران

سرشناسه	فاطمی، شهره، ۱۳۳۵-
عنوان و نام پدیدآور	کاربرد آمار و طراحی آزمایش‌ها در رشته‌های علوم و مهندسی / تألیف شهره فاطمی، مانده سلماسی.
مشخصات نشر	تهران: دانشگاه تهران، مؤسسه انتشارات، ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری	۵۸۸ ص. مصور، جدول، نمودار.
فروست	انتشارات دانشگاه تهران؛ شماره انتشار ۳۷۷۹.
شابک	978-964-03-6973-9
وضعیت فهرست‌نویسی	فیپا
یادداشت	کتابنامه.
موضوع	آمار-- راهنمای آموزشی (عالی)
موضوع	Statistics--Study and Teaching (Higher)
موضوع	مهندسی-- روش‌های آماری-- راهنمای آموزشی (عالی)
موضوع	Engineering--Statistical Methods-- Study and Teaching (Higher)
شناسه افزوده	سلماسی، مانده، ۱۳۶۴-
شناسه افزوده	دانشگاه تهران. مؤسسه انتشارات
رده‌بندی کنگره	۱۳۹۶ قک۲/ف۲۷۶/قا
رده‌بندی دیویی	۵۱۹/۵۰۷۶
شماره کتابشناسی ملی	۴۴۲۲۰۴۳

این کتاب مشمول قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان است. تکثیر کتاب به هر روش اعم از فتوکپی، ریسوگرافی، تهیه فایل‌های pdf، لوح فشرده، بازنویسی در وبلاگ‌ها، سایت‌ها، مجله‌ها و کتاب، بدون اجازه کتبی ناشر مجاز نیست و موجب پیگرد قانونی می‌شود و تمامی حقوق برای ناشر محفوظ است.

ISBN:978-964-03-6973-9



9 789640 369739

عنوان: کاربرد آمار و طراحی آزمایش‌ها در رشته‌های علوم و مهندسی

تألیف: دکتر شهره فاطمی - مهندس مانده سلماسی

نوبت چاپ: اول

تاریخ انتشار: ۱۳۹۶

شمارگان: ۵۰۰ نسخه

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

چاپ و صحافی: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

«مسئولیت صحت مطالب کتاب با مؤلفان است»

بها: ۳۸۰۰۰۰ ریال

خیابان کارگر شمالی - خیابان شهید فرش مقدّم - مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

پست الکترونیک: press@ut.ac.ir - تارنما: <http://press.ut.ac.ir>

پخش و فروش: تلفکس ۸۸۳۳۸۷۱۲

فهرست مطالب

پیشگفتار.....	ر
مقدمه.....	ش
بخش اول: آمار.....	۱
مقدمه و تعریفها.....	۳
فصل اول: آمار توصیفی.....	۱۱
۱. مقدمه.....	۱۱
۱.۱ پارامترهای مرکزی.....	۱۱
۱.۱.۱ میانگین.....	۱۲
۱.۱.۲ میانه.....	۱۲
۱.۱.۳ نما.....	۱۲
۱.۱.۴ چارکها.....	۱۳
۲.۱ پارامترهای پراکندگی.....	۱۵
۱.۲.۱ دامنه تغییرات.....	۱۵
۲.۲.۱ دامنه میان چارکی.....	۱۵
۳.۲.۱ واریانس جامعه.....	۱۵
۴.۲.۱ انحراف معیار جامعه.....	۱۵
۵.۲.۱ ضریب پراکندگی.....	۱۶
۳.۱ طبقه‌بندی داده‌ها.....	۱۶
۱.۳.۱ طبقه‌بندی عددی.....	۱۷
۱.۱.۳.۱ سازماندهی داده‌ها به صورت جدول توزیع فراوانی.....	۱۷
۲.۱.۳.۱ تعیین پارامترهای جامعه براساس جدول فراوانی فراوانی.....	۱۸
۲.۳.۱ طبقه‌بندی هندسی.....	۲۲
۳.۳.۱ تعیین پارامترهای چولگی و برآمدگی جامعه.....	۲۹
فصل دوم: احتمال.....	۳۹

۳۹	۲. مقدمه.....
۳۹	۲.۱ مفهوم احتمال.....
۴۰	۲.۲ تعریف‌ها
۴۴	۲.۳ خاصیت کلی احتمال
۴۲	۲.۴ قاعده‌های احتمال.....
۴۶	۲.۵ تابع‌های توزیع احتمال
۴۶	۲.۵.۱ توزیع دو جمله‌ای.....
۴۷	۲.۵.۲ توزیع پواسن
۷۵	۲.۵.۳ توزیع نرمال.....
۴۸	۲.۵.۳.۱ اثر میانگین و انحراف معیار در منحنی نرمال
۴۹	۲.۵.۳.۲ خاصیت تابع توزیع نرمال.....
۵۰	۲.۵.۴ تابع توزیع نرمال استاندارد.....
۵۵	۲.۶ تحقیق نرمال بودن مشاهدات.....

فصل سوم: نمونه‌گیری و توزیع نمونه‌ها..... ۶۱

۶۱	۳. مقدمه.....
۶۲	۳.۱ روش‌های نمونه‌گیری.....
۶۲	۳.۱.۱ نمونه‌گیری تصادفی ساده.....
۶۳	۳.۱.۲ نمونه‌گیری منظم.....
۶۳	۳.۱.۳ نمونه‌گیری گروهی.....
۶۴	۳.۱.۴ نمونه‌گیری خوشه‌ای.....
۶۴	۳.۱.۵ نمونه‌گیری مرحله‌ای.....
۶۴	۳.۱.۶ روش نمونه‌گیری تصادفی ساده با جای‌گذاری و بدون جای‌گذاری.....
۶۵	۳.۲ توزیع نمونه‌گیری
۶۶	۳.۳ قضیه حد مرکزی.....

فصل چهارم: امید ریاضی..... ۷۱

۷۱	۴. مقدمه.....
۷۲	۴.۱ امید ریاضی ترکیب خطی چند متغیر تصادفی.....

۷۳.....	۲.۴ واریانس ترکیب خطی چند متغیر تصادفی.....
۷۵.....	۳.۴ واریانس مجموع دو متغیر تصادفی
۷۵.....	۴.۴ واریانس ترکیب خطی چند متغیر تصادفی.....
۷۷.....	۱.۴.۴ واریانس میانگین نمونه‌های تصادفی مستقل از جامعه‌ای با واریانس σ^2
۷۸.....	۲.۴.۴ واریانس اختلاف دو متغیر مستقل.....
۷۸.....	۳.۴.۴ واریانس اختلاف دو میانگین مستقل با n بارمشاهده از جامعه.....
۷۸.....	۵.۴ واریانس جامعه و واریانس نمونه.....

فصل پنجم: تخمین آماری ۸۵

۸۵.....	۵. مقدمه.....
۸۶.....	۱.۵ تخمین آماری.....
۸۶.....	۲.۵ سطح اطمینان.....
۸۸.....	۳.۵ تخمین فاصله‌ای میانگین یک جامعه.....
۹۰.....	۱.۳.۵ تخمین میانگین جامعه آماری نرمال با انحراف معیار معلوم.....
۹۳.....	۲.۳.۵ تخمین میانگین جامعه آماری نرمال با انحراف معیار نامعلوم.....
۹۸.....	۳.۳.۵ تخمین میانگین جامعه غیر نرمال.....
۹۹.....	۴.۵ مقایسه میانگین دو جامعه با یکدیگر.....
۱۰۰.....	۱.۴.۵ مقایسه میانگین دو جامعه آماری نرمال با واریانس‌های معلوم.....
۱۰۱.....	۲.۴.۵ مقایسه میانگین دو جامعه آماری نرمال با انحراف معیارهای نامعلوم.....
۱۰۵.....	۳.۴.۵ تخمین فاصله‌ای تفاضل میانگین دو جامعه وابسته.....
۱۰۷.....	۵.۵ تخمین فاصله‌ای واریانس جامعه.....
۱۱۰.....	۱.۵.۵ تخمین فاصله‌ای نسبت واریانس دو جامعه.....
۱۱۳.....	۶.۵ آزمون فرضیه‌ها.....
۱۱۳.....	۱.۶.۵ آزمون فرض‌ها برای میانگین.....
۱۲۳.....	۲.۶.۵ آزمون فرض آماری برای واریانس.....
۱۲۳.....	۱.۲.۶.۵ آزمون واریانس یک جامعه.....
۱۲۵.....	۲.۲.۶.۵ آزمون مقایسه واریانس دو جامعه.....

فصل ششم: رگرسیون ۱۴۱

۱۴۱	۶. مقدمه
۱۴۱	۶.۱ مدل رگرسیون خطی ساده
۱۴۵	۶.۱.۱ ضریب تبیین
۱۴۷	۶.۱.۲ ضریب همبستگی
۱۴۹	۶.۱.۳ رابطه میان ضریب رگرسیون و همبستگی
۱۵۱	۶.۱.۴ رابطه میان ضریب تبیین و همبستگی
۱۵۱	۶.۱.۵ معناداربودن مدل رگرسیون
۱۵۲	۶.۱.۶ بررسی معناداربودن پارامتری مدل
۱۵۳	۶.۱.۱.۱ بررسی معناداربودن ضریب زاویه (b)
۱۵۴	۶.۱.۱.۲ بررسی معناداربودن عرض از مبدأ (a)
۱۵۴	۶.۱.۱.۳ محدوده تابع واقعی
۱۵۷	۶.۲ مدل رگرسیون خطی چندگانه
۱۵۸	۶.۲.۱ استفاده از محاسبات رایانه‌ای
۱۶۰	۶.۲.۲ بررسی معنی‌داربودن شاخص‌های رگرسیون چندگانه
۱۶۵	۶.۲.۳ آنالیز خطاها

فصل هفتم: تحلیل واریانس ۱۷۵

۱۷۵	۷. مقدمه
۱۷۶	۷.۱ واریانس مشترک
۱۷۷	۷.۲ تحلیل واریانس یک‌طرفه
۱۸۰	۷.۲.۱ تحلیل واریانس یک‌طرفه‌ی متعادل
۱۸۱	۷.۲.۲ تحلیل واریانس غیر متعادل
۱۸۲	۷.۲.۳ آزمون فرض‌ها
۱۹۰	۷.۲.۴ آزمون کمترین تفاوت معنادار
۱۹۱	۷.۳ تحلیل واریانس دو طرفه
۱۹۱	۷.۳.۱ تحلیل واریانس دو طرفه بدون تکرار آزمایش‌ها
۲۰۰	۷.۳.۲ تحلیل واریانس دو طرفه با تکرار آزمایش‌ها
۲۰۵	۷.۳.۳ تحلیل واریانس دو طرفه با تکرار نابرابر آزمایش‌ها (تحلیل غیرمتعادل)
۲۰۸	۷.۴ تحلیل واریانس سه طرفه

۲۱۶.....	۵.۷ طرح تحلیل واریانس آشیانه‌ای.....
۲۲۷.....	بخش دوم: طراحی آزمایش‌ها.....
۲۲۹.....	مقدمه.....
۲۳۷.....	فصل اول: طرح‌های مربعی.....
۲۳۷.....	۱. مقدمه.....
۲۳۷.....	۱.۱ طرح مربع لاتین.....
۲۴۳.....	۲.۱ طرح مربع لاتین یونانی.....
۲۴۵.....	۳.۱ طرح مربع یودن.....
۲۵۳.....	فصل دوم: طرح‌های عاملی.....
۲۵۳.....	۲. مقدمه.....
۲۵۳.....	۱.۲ طرح یک متغیر در آن واحد.....
۲۵۶.....	۲.۲ طرح‌های چند عاملی (فاکتوریل).....
۲۶۴.....	۱.۲.۲ طرح فاکتوریل دوسطحی (طرح عاملی با دو سطح یا 2^k).....
۲۶۷.....	۱.۲.۲ تحلیل نتایج طرح فاکتوریل دو سطحی.....
۲۷۰.....	۲.۲.۱ تحلیل واریانس.....
۲۷۵.....	۲.۲.۱ تحلیل رگرسیون.....
۲۷۷.....	۲.۲.۱ تحلیل گرافیکی.....
۲۸۲.....	۲.۲.۲ استفاده از نقطه‌ی مرکزی در طرح فاکتوریل دوسطحی.....
۲۹۳.....	۳.۲.۲ طرح فاکتوریل جزئی دو سطحی (2^{k-p}).....
۲۹۴.....	۳.۲.۲ تشکیل جدول فاکتوریل جزئی از روی جدول فاکتوریل کامل.....
۲۹۷.....	۳.۲.۲ مراحل طراحی آزمایش به روش فاکتوریل جزئی 2^{k-p}
۳۱۵.....	۳.۳.۲ طرح انعکاسی یا تاخوردۀ برای جدا کردن اثرها.....
۳۲۱.....	۴.۲.۲ طرح فاکتوریل با سه سطح (طرح عاملی سه سطحی یا 3^k).....
۳۲۲.....	۱.۴.۲.۲ طرح 3^2
۳۲۴.....	۲.۴.۲.۲ طرح 3^3
۳۳۵.....	فصل سوم: طراحی به روش پلاکت-برمن.....

د □ کاربرد آمار و طراحی آزمایش‌ها در رشته‌های علوم و مهندسی

۳۳۵.....	۳. طرح پلاکت-برمن
۳۴۴.....	۱.۳ طرح تاخوردۀ پلاکت- برمن.....

فصل چهارم: طراحی به روش رویه پاسخ..... ۳۵۱

۳۵۱.....	۴. طرح رویه پاسخ.....
۳۵۵.....	۱.۴ طراحی به روش ترکیب مرکزی.....
۳۶۶.....	۲.۴ طرح باکس- بنکن
۳۶۸.....	۱.۲.۴ ایجاد طرح باکس- بنکن با ۴ عامل ($k - 4$).....
۳۶۹.....	۲.۲.۴ ایجاد طرح باکس- بنکن با ۵ عامل ($k - 5$)
۳۷۶.....	۳.۴ بهینه‌سازی

فصل پنجم: طراحی به روش D-Optimal..... ۴۰۹

۴۰۹.....	۵. طرح به روش D-Optimal.....
۴۱۲.....	۱.۵ مجموعه کاندید
۴۱۲.....	۲.۵ ماتریس طرح.....
۴۱۴.....	۳.۵ ماتریس اطلاعات و ماتریس پراکندگی.....
۴۱۵.....	۴.۵ معیار برای بهترین طرح D-Optimal
۴۱۹.....	۵.۵ مدل‌های پیشنهادی
۴۱۹.....	۱.۵.۵ مدل‌های خطی.....
۴۱۹.....	۲.۵.۵ مدل تداخلی
۴۲۰.....	۳.۵.۵ مدل درجه دوم
۴۲۰.....	۶.۵ تعداد آزمایش‌های طرح D-Optimal

فصل ششم: طراحی به روش تاگوچی..... ۴۳۱

۴۳۱.....	۶. مقدمه
۴۳۳.....	۱.۶ تعریف‌ها.....
۴۳۴.....	۲.۶ طراحی یک آرایۀ متعامد.....
۴۳۵.....	۳.۶ چگونگی بررسی اثرهای متقابل در روش تاگوچی
۴۴۰.....	۴.۶ مراحل اجرای یک طرح تاگوچی

۴۴۱	..... ۱,۴,۶ طراحی آرایه متعامد مناسب
۴۴۴	..... ۲,۴,۶ تحلیل آماری و به دست آوردن شرایط بهینه
۴۶۱	..... فصل هفتم: طراحی به روش مخلوط
۴۶۱	..... ۷. طرح به روش مخلوط
۴۶۳	..... ۱. ۷ مدل های رگرسیون رایج طرح مخلوط
۴۶۴	..... ۲. ۷ انواع طرح های مخلوط
۴۶۴	..... ۱. ۲. ۷ طرح شبکه ای ساده
۴۷۰	..... ۲. ۲. ۷ طرح مرکزی ساده
۴۷۴	..... ۳. ۲. ۷ طرح غربالی شبکه ای ساده
۴۷۷	..... ۴. ۲. ۷ طرح غربالی رأس های توسعه یافته
۴۸۰	..... ۳. ۷ طرح فاکتوریل کامل همراه با طرح مخلوط
۴۸۹	..... فصل هشتم: بهینه سازی
۴۸۹	..... ۸. بهینه سازی
۴۸۰	..... ۱. ۸ بهینه سازی به روش خطی
۴۹۰	..... ۱. ۱. ۸ روش هندسی (ترسیمی)
۴۹۳	..... ۲. ۱. ۸ الگوریتم سیمپلکس
۴۹۴	..... ۱. ۲. ۱. ۸ ساخت الگوریتم سیمپلکس برای حداکثر سازی
۵۰۰	..... ۲. ۲. ۱. ۸ ساخت الگوریتم سیمپلکس برای کمینه سازی
۵۰۲	..... ۲. ۸ بهینه سازی غیر خطی
۵۰۲	..... ۱. ۲. ۸ بهینه سازی به روش گرادیانی
۵۱۲	..... ۲. ۲. ۸ بهینه سازی به روش غیرگرادیانی
۵۱۷	..... ۳. ۲. ۸ روش جست و جوی مستقیم
۵۲۰	..... ۱. ۳. ۲. ۸ بهینه سازی به روش جست و جوی کامل
۵۲۱	..... ۲. ۳. ۲. ۸ روش جست و جوی دو بخشی
۵۲۱	..... ۳. ۳. ۲. ۸ بهینه سازی به روش جست و جوی طلایی
۵۲۹	..... پیوست

پیشگفتار

معمولاً در بررسی یک پدیده یا فرایند، شناخت مبانی و سازوکار آن پدیده، عوامل مؤثر، امکان انجام دادن، تکرار، اصلاح و توسعه فرایند مدنظر است. اینکه چه عواملی با چه سازوکاری به وقوع یک پدیده منجر می‌شود محقق را وامی‌دارد که رفتار فرایند را بررسی و ارزیابی کند. هنگامی که سازوکار و رفتار فرایند شناسایی شود، آن فرایند قابلیت مدل‌سازی و شبیه‌سازی پیدا می‌کند و حتی می‌توان در جهت بهینه‌کردن شرایط به هدف دستیابی به محصولی مناسب یا ارتقای آن حرکت نمود.

مدل‌هایی که قابلیت پیش‌بینی رفتار یک پدیده یا فرایند را دارند، به دو دسته مهم نظری و تجربی تقسیم‌بندی می‌شوند. در مدل‌های نظری، معادلات مدل بر قوانین و روابط فیزیکی استوار است و با روش‌های محاسباتی عملکرد متغیرهای گوناگون تعیین می‌شود. در مدل‌های تجربی، از آنجاکه دید عمیقی بر رابطه‌ی فیزیکی اجزا و تحولات وجود ندارد، استفاده از روش‌های آزمایشی و تجربی بیشترین کاربرد را برای شناخت رفتار فرایند دارد. در چنین شرایطی، استفاده از علم آمار بسیار ضروری به‌نظر می‌رسد.

معمولاً برای انجام دادن آزمایش‌های تجربی در فرایندهای ناشناخته، با متغیرهای متعددی مواجهیم که اثر هر متغیر بر سایر متغیرها ناشناخته است. همچنین، محقق در انجام آزمایش‌ها درگیر خطاهای گوناگونی نیز هست؛ از جمله خطاهای تصادفی، خطاهای نظام‌مند و خطاهای کنترل‌ناشدنی مثل اثرها و اغتشاش‌های محیطی. به‌علاوه، دستگاه‌ها و وسایل اندازه‌گیری و کنترلی فرایند نیز هر کدام دارای خطای اندازه‌گیری‌اند که امکان تکرارپذیری آزمایش‌ها را کاهش می‌دهد و در نتیجه از دقت و صحت نتایج می‌کاهد. چه‌بسا در بسیاری از مواقع محقق فکر می‌کند که مثلاً اثر فشار، دما و ... در فرایند مؤثر نبوده است، ولی در واقع این دریافت ممکن است به‌علت خطای روش یا خطای اندازه‌گیری باشد. به همین دلیل، برای رسیدن به قطعیت به صرف وقت، هزینه و زمان زیادی نیاز است. همچنین لازم است از روشی علمی برای طراحی، انجام دادن آزمایش‌ها و تحلیل نتایج استفاده شود تا علاوه بر انجام تعداد آزمایش‌های کمتر، اثر خطاهای تصادفی و عدم قطعیت‌ها در نتایج نیز کاهش یابد.

برای طراحی آزمایش‌ها بدون استفاده از آمار، معمولاً آزمایش‌ها را به‌صورت تغییر یک متغیر در آن واحد ترتیب می‌دهند و با ثابت نگاه داشتن متغیرهای دیگر، مرحله به مرحله اثر هر متغیر را برآورد می‌کنند تا به ترتیب اثر همه متغیرها مشخص شود. در این حالت، تأثیر هر عامل بدون اثرهای تداخلی عامل‌های دیگر و بدون در نظر گرفتن میزان صحت و دقت نتایج ارزیابی می‌شود که این خود سبب عدم قطعیت نتایج می‌شود. اگر آزمایش‌ها بر مبنای علم طراحی آزمایش استوار شود، علاوه بر مشخص شدن اثر تداخلی متغیرها، خطاهای احتمالی در کل آزمایش‌ها به‌صورت تصادفی پخش و اثر متغیرها هم‌زمان

مقدمه □ ز

با حد بالایی از اطمینان برآورد می‌شود. با توجه به نوع طرح آزمایش، مدلی پیشنهاد می‌شود که مناسب بودن آن براساس دقت و صحت نتایج ارزیابی شده است. از این مدل می‌توان با اطمینان بیشتری برای تکرار، اصلاح و بهینه‌کردن نتایج استفاده کرد.

با تجربیاتی که مؤلف در تحقیق و استفاده از روش‌های آماری طراحی آزمایش‌ها داشته، دریافته است که حتی وقتی از مدل نظری ریاضی جهت مدل‌سازی فرایند استفاده شده باشد، به راحتی می‌توان با روش آماری، مدلی ساده‌تر، سریع‌تر و استنادپذیر ساخت که بتواند رفتار فرایند را در محدوده شرایط عملیاتی طراحی شده پیش‌بینی کند و به این ترتیب، با کمک مدل ساده‌تر، بهینه‌سازی و کنترل فرایند را سریع‌تر به انجام رساند. پژوهشگرانی که از شبیه‌سازهای سنگین و وقت‌گیر استفاده می‌کنند، با کمک این روش در مراحل بعدی که شامل اصلاح، بهینه‌سازی و کنترل فرایند است، می‌توانند مشاهده‌گری با ضریب اطمینان بالا داشته باشند که بتواند سریع‌تر تصمیم گیرد و با تغییر شرایط ورودی شرایط بهینه را محاسبه کند.

کتاب حاضر با هدف آشنایی با کاربرد علم آمار، تحلیل آماری و طراحی آزمایش‌ها در شناخت پدیده‌ها و فرایندهای پیچیده و بررسی اثر معنادار متغیرهای فرایند بر پاسخ و تنظیم شرایط برای دستیابی به نقطه بهینه تدوین شده است. در این کتاب تمامی نیازهای یک محقق برای یافتن دیدگاه آماری و روش‌های محاسباتی بر مبنای آمار تحلیلی ارائه شده است که خواننده را از مراجع دیگر بی‌نیاز می‌کند. در این کتاب، اثبات همه روابط آماری نیز ارائه شده است. ضمن اینکه انواع روش‌های طراحی آزمایش‌ها شامل روش‌های متعامد و غیرمتعامد، روش‌های غربالی و غیرغربالی و تاخورد، روش‌های ساده، ترکیبی و مخلوط به‌طور مشروح بیان و مثال‌های کاربردی برای هر یک ارائه شده است. این کتاب به گونه‌ای نوشته شده است که به محقق کمک می‌کند که بداند چه نوع طرحی را برای مسئله خود با توجه به نوع، محدودیت و تعداد متغیرهای مطرح انتخاب کند و در نهایت چه اطلاعاتی را از نتایج طرح انتخابی به دست آورد. از سوی دیگر، برای تسریع در محاسبات آماری، برخی از مسائل با کمک نرم‌افزارهای آماری مانند Minitab و Design Expert حل شده است. همچنین، چگونگی محاسبات در هر مرحله توضیح داده شده است تا خواننده قادر باشد، بدون نیاز به نرم‌افزار، محاسبات و ارزیابی نتایج را خود انجام دهد.

کتاب حاضر از دو بخش اصلی تشکیل شده است: بخش اول (آمار) شامل آمار توصیفی و آمار تحلیلی است. تمام مباحث مربوط به مشاهده، جمع‌آوری، دسته‌بندی، نمایش و تعیین شاخص‌های مرکزی و پراکندگی جامعه در مبحث آمار توصیفی مطرح شده است. منحنی‌های توزیع احتمال، قضیه حد مرکزی، روش‌های نمونه‌گیری، نظریه تخمین و آزمون فرضیه‌ای آماری برای میانگین و واریانس

س □ کاربرد آمار و طراحی آزمایش‌ها در رشته‌های علوم و مهندسی

جامعه، رگرسیون، تحلیل واریانس و مقایسه چند جامعه با یکدیگر در فصل‌های مربوط به آمار تحلیلی ارائه شده است.

بخش دوم کتاب که به طراحی آزمایش‌ها اختصاص یافته است، شامل توصیفی از طرح‌های مربعی، طرح فاکتوریل دوسطحی و سه سطحی، طرح فاکتوریل جزئی، طرح پلاکت-برمن، طرح‌های تاخورد، انواع طرح‌های رویه پاسخ، طرح D-Optimal، طرح‌های تاگوچی، طرح‌های مخلوط و ترکیبی می‌باشد. در هر مبحث جهت بهینه کردن شرایط آزمایشی از تکنیک‌های بهینه‌سازی نیز استفاده شده است. در فصل آخر این بخش روش‌های بهینه‌سازی برای مدل‌های آماری ارائه شده است. این روش‌ها شامل روش سیمپلکس، روش‌های مبتنی بر گرادیان و نیز روش جست‌وجوی مستقیم‌اند. همچنین، در این فصل، برخی از روش‌های بهینه‌سازی که بر مبنای مدل نیستند و همراه با آزمایش انجام می‌شوند نیز ارائه شده است.

در انتهای کتاب، پیوست ارائه شده است که شامل همه جدول‌های آماری مورد نیاز آمار تحلیلی و جدول‌های مربوط به طراحی آزمایش‌ها است تا خواننده از رجوع به کتاب‌های دیگر بی‌نیاز باشد. به‌طور کلی، این کتاب به محقق کمک می‌کند تا بتواند پیش از انجام هرگونه آزمایش از ابتدا تصمیم بگیرد که مسئله خود را چگونه طراحی کرده و از کدام روش طراحی آزمایش با حداقل تعداد آزمایش به حداکثر نتایج ممکن دست یابد.

مولفان

شهره فاطمی

مائده سلماسی

مقدمه

امروزه به منظور پردازش داده‌های خام و دستیابی به برنامه‌ریزی‌های بهینه و یا تصمیم‌گیری‌های علمی از علم آمار استفاده می‌شود و روزبه‌روز بر گستره این دانش در جهان افزوده می‌شود. از جمله کاربردهای این علم می‌توان به کنترل کیفیت آماری، طراحی آزمایش‌ها، داده‌کاوی و پیش‌بینی نتایج اشاره کرد.

دانش طراحی آزمایش‌ها ابزاری قدرتمند برای مهندسان و مدیرانی است که می‌خواهند محصولات خود را با کیفیت عالی و کمترین هزینه طراحی و یا تولید کنند. طراحی آزمایش‌ها یکی از قوی‌ترین فنون بهبود کیفیت و افزایش بهره‌وری است. در این روش با انجام آزمایش‌های هدفمند، تغییراتی در فرایند یا سیستم مورد مطالعه اعمال می‌شود تا تأثیر آنها در ویژگی‌های عملکردی یا پاسخ فرایند بررسی شود. در نهایت، رفتار فرایند در برابر تغییرات عوامل موثر، با در نظر گرفتن محدوده‌ای از خطا و در سطحی از اطمینان، پیش‌بینی می‌شود.

در کتاب حاضر، از علم آمار همچون روشی هدفمند در طراحی و تحلیل آزمایش‌ها استفاده می‌شود. بر این اساس، کتاب حاضر در دو بخش ارائه شده است: بخش اول به مبحث آمار شامل آمار توصیفی و آمار تحلیلی اختصاص یافته است. آمار توصیفی به جمع‌آوری، دسته‌بندی، نمایش داده‌ها، تحلیل و استخراج شاخص‌های جامعه آماری می‌پردازد. آمار تحلیلی علم تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت است که به جامعه اصلی دسترسی ندارد و با کمک نمونه‌گیری و اطلاعات نمونه‌ها تصمیم‌گیری می‌کند. بخش دوم کتاب به چگونگی طراحی و اجرای یک پروژه آزمایشی-آماري اختصاص یافته است. این بخش شامل روش‌های گوناگون طراحی آزمایش‌ها، چگونگی و ترتیب انجام دادن آزمایش‌ها، محاسبات و تحلیل آماری نتایج، فرمولاسیون و مدل‌سازی آماری، تفسیر و مقایسه نتایج با یکدیگر و در انتها بهینه‌سازی است. در واقع، این بخش از کتاب به طراحی آزمایش‌ها با نگرش آماری¹ اختصاص یافته است که سعی می‌کند با انجام دادن حداقل تعداد آزمایش‌ها به حداکثر نتایج و اطلاعات دست یابد و در شرایط عدم قطعیت، نتایج استنادپذیر ارائه دهد. با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها می‌توان پیش-بینی کرد که در صورت وجود خطا و اغتشاش‌های کنترل‌ناپذیر، نتایج یک فرایند تا چه حد از

¹ Statistical Design of Experiment

ص □ کاربرد آمار و طراحی آزمایش‌ها در رشته‌های علوم و مهندسی

تکرارپذیری، دقت^۱ و صحت^۲ لازم برخوردار است و می‌توان رفتار فرایند را بیان کرد. به‌منظور درک بیشتر نیاز محقق به علم آمار و طراحی آزمایش‌ها به مثال زیر توجه کنید.

مثال- بررسی و ارائه شرایط مناسب برای انجام دادن یک فرایند

یک پژوهشگر کاتالیزوری جدید تولید کرده است و می‌خواهد آن را به‌عنوان ماده مناسب برای فرایند تبدیل گاز به محصولات با ارزش به صنعت ارائه دهد.

اگرچه محقق دقت کافی برای به‌حداقل‌رساندن خطاهای آزمایش‌ها را داشته و تکرارهای لازم را انجام داده است، در هر صورت خطاهای تصادفی^۳ و نظام‌مند (سیستماتیک)^۴ به اختلاف در پاسخ‌ها منجر می‌شود. در این حالت با استفاده از روش‌های آماری می‌توان این محقق را به‌سوی رسیدن به شرایط اتکاپذیر هدایت کرد. در اینجا، با طرح چند سؤال و ارائه جواب، در غالب طراحی آزمایش و تحلیل، هدف از اجرای روش‌های آماری مشخص می‌شود.

سوال ۱: آیا شاهدهی هست که کاتالیزور تولیدشده بتواند خلوص محصولات حاصل از واکنش را به حد استاندارد کاهش دهد؟

طراحی آزمایش و تحلیل: جواب این سؤال وقتی به‌دست می‌آید که چند بار کاتالیزور جدید آزمایش شود و متوسط پاسخ حاصل از این نمونه‌ها (درصد خلوص محصول) با مقدار استاندارد (به عنوان مبنا) مقایسه شود. این نوع طراحی آزمایش و آنالیز را مقایسه متوسط نمونه‌ها با میانگینی معلوم گویند.

نتیجه: فرض می‌شود که از نظر آماری نتیجه شده است که درصد خلوص چشمگیری در محصول ملاحظه می‌شود، ولی به مقدار استاندارد مورد نیاز نمی‌رسد.

پیشنهاد: به این ترتیب به محقق پیشنهاد می‌شود که کاتالیزوری با کارایی بالاتر ساخته شود.

سوال ۲: چگونه می‌توان فهمید کاتالیزور جدید با کاتالیزور قبلی که در صنعت استفاده می‌شود، تفاوت معناداری دارد؟

طراحی آزمایش و آنالیز: در این حالت چند آزمایش با کاتالیزور جدید انجام می‌شود، متوسط درصد خلوص محصول اندازه‌گیری و با متوسط درصد خلوص حاصل از کاتالیزور قبلی مقایسه می‌شود. این نوع طراحی آزمایش و آنالیز را مقایسه دو متوسط با یکدیگر گویند.

¹ Precision

² Accuracy

³ Random Error

⁴ Systematic Error

مقدمه □ ض

نتیجه: فرض می‌شود که نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داد که کارایی این دو کاتالیزور تفاوت معناداری با یکدیگر ندارد.

پیشنهاد: در این مرحله محقق متوجه می‌شود که درباره کاتالیزور با کیفیت بالاتر در اشتباه بوده و اصلاحی انجام نشده است. حال محقق تصمیم می‌گیرد که کاتالیزور خود را با کاتالیزورهای تجاری موجود در بازار مقایسه کند. البته کاتالیزور این محقق از کاتالیزورهای تجاری موجود در بازار ارزان‌تر است؛ بنابراین کار را ادامه می‌دهد.

سوال ۳: چگونه می‌توان فهمید که کاتالیزور موجود با کاتالیزورهای تجاری تفاوت معناداری دارد؟
طراحی آزمایش و آنالیز: برای یافتن جواب لازم است مقایسه بیش از دو متوسط انجام شود؛ یعنی برای هر کاتالیزور چند بار آزمایش انجام و متوسط پاسخ در آزمایش‌های حاصل از هر کاتالیزور با یکدیگر مقایسه می‌شود.

نتیجه: فرض کنید با انجام دادن این آزمایش‌ها محقق درمی‌یابد که کاتالیزور خودش از کاتالیزورهای تجاری بهتر است، یعنی اختلاف معناداری میان این کاتالیزور و کاتالیزورهای تجاری وجود دارد. البته این حد از درصد خلوص محصول واکنش از نظر استانداردهای روز دنیا هنوز کافی نیست و باید برای آن آزمایش‌های دیگری انجام شود.

پیشنهاد: پیشنهاد می‌شود که بررسی اثر عوامل گوناگون برای افزایش کارایی کاتالیزور مورد نظر و رساندن آن به حد استانداردهای روز انجام شود.

سوال ۴- آیا تغییر در متغیرهای عملیاتی فرایند مثل دما، فشار، دبی خوراک، توزیع آن و مقدار کاتالیزور موجب افزایش کیفیت محصول به سمت شرایط استاندارد می‌شود؟

طراحی آزمایش و آنالیز: با روش طراحی آزمایش‌های آماری اثر همزمان چند متغیر مستقل را می‌توان روی پاسخ فرایند (درصد خلوص محصول) بررسی کرد. با این آزمایش‌ها می‌توان روند اثر هر متغیر و حتی اثرهای متقابل آنها را روی پاسخ تعیین کرد و از این میان متغیرهایی که اثر معناداری دارند از متغیرهای دیگر تشخیص داد.

نتیجه: در این صورت، با طراحی آزمایش‌ها و تحلیل نتایج، متغیرهای عملیاتی مؤثر مشخص و پیشنهاد می‌شود. حاصل این کار مدلی آماری است که همزمان اثر همگی عامل‌ها را بر پاسخ تعیین می‌کند. با کمک این مدل سعی می‌شود متغیرهای مؤثر تا حدی تغییر داده شود که درصد خلوص محصول به مقدار استاندارد برسد^۱.

^۱ شایان ذکر است که این بحث فقط یک مثال است و قطعاً تغییر شرایط عملیاتی تابع مسائل اقتصادی و غیره است که خود به بررسی و تحلیل نیاز دارد.

ط □ کاربرد آمار و طراحی آزمایش‌ها در رشته‌های علوم و مهندسی

پیشنهاد: حال لازم است اثر عوامل کنترل‌ناپذیر محیطی (اغتشاش‌ها) نیز بر کارایی کاتالیزور بررسی شود.

سوال ۵: آیا متغیرهای محیطی از جمله دمای محیط، تغییر ترکیب درصد خوراک ورودی و وجود برخی ناخالصی‌ها بر کارایی کاتالیزور اثر دارد؟

طراحی آزمایش و آنالیز: طراحی آزمایش‌ها براساس متغیرهای جدید باید برای بررسی اثرهای معنادار آنها انجام شود.

نتیجه: فرض می‌شود که عوامل گوناگون بررسی شده، در کارایی کاتالیزور اثر معناداری نداشته است. در این شرایط شرکت بررسی‌کننده به این نتیجه می‌رسد که تولید این کاتالیزور موجه است و در نتیجه مرحله‌ی افزایش مقیاس آغاز می‌شود.

شایان ذکر است، طراحی آزمایش و آنالیز نتایج کمک می‌کند که هم بتوان برای پیشگویی پاسخ سیستم در مقابل متغیرهای فرایند مدلی ارائه داد و هم بتوان شرایط بهینه را برای متغیرهای مستقل برای رسیدن به بالاترین کارایی کاتالیزور پیشنهاد کرد.

بهینه‌سازی شرایط عملیاتی از موارد مهمی است که محقق در مرحله‌ی پژوهش و نیز در مرحله‌ی افزایش مقیاس بدان نیاز دارد تا بتواند با صرف انرژی و هزینه‌ی کمتر به بیشترین بازده در طولانی‌ترین زمان عملیاتی دست یابد. از آنجاکه متغیرهای فرایند هم‌زمان بر پاسخ فرایند مؤثرند، بنابراین با استفاده از مدل‌های آماری استخراج‌شده می‌توان بهینه‌سازی کرد و محدوده‌ای از متغیرهای فرایند را برای رسیدن به تابع هدف مناسب پیشنهاد داد.

با توجه به مثال ذکر شده تا حدودی مشخص می‌شود که برای انجام دادن آزمایش‌ها، بررسی تکرارپذیری، تحلیل، مقایسه‌ی نتایج و تعیین عامل‌های موثر و رسیدن به نتایج بهینه، تا چه حد به دانستن علم آمار نیاز است.