

طراحی و تحلیل آزمایش‌ها (نظریه و کاربردها)

پدیدآورندگان

دکتر علی زینل همدانی

استاد دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها

دانشگاه صنعتی ام‌شاه

دکتر امین شهریار

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی کرمانشاه

دکتر محمدتقی رضوان

استادیار دانشکده مهندسی صنایع

دانشگاه کاشان



دانشگاه آصفهان
مرکز نشر

شماره کتاب ۱۵۹

گروه فنی و مهندسی ۶۷

طراحی و تحلیل آزمایش ها (نظریه و کاربردها)

پدیدآورندگان:	علی زینل همدانی، امین شهسوار، محمدتقی رضوان
صفحه آ:	شقایق نصیری
طراح جلد:	مرضیه خردمند
ویراستار علمی:	مهدی علیتقیان
ویراستار ادبی:	محبوبه شمس
ناشر:	مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان
لیتوگرافی، چاپ و صحافی:	چاپخانه دانشگاه صنعتی اصفهان
چاپ اول:	بهار ۱۳۹۷
شمارگان:	۵۰۰ جلد
شابک:	۹۷۸-۶۰۰-۸۲۵۷-۲۲-۶
قیمت:	۱۶,۰۰۰ ت.

سرشناسه	زینل همدانی، علی، ۳۱ -
عنوان و نام پدیدآور	طراحی و تحلیل آزمایش ها (نظریه و کاربردها) / پدیدآورندگان علی زینل همدانی، امین شهسوار، محمدتقی رضوان؛ ویراستار مهدی علیتقیان؛ ویراستار ادبی محبوبه شمس.
مشخصات نشر	اصفهان : دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری	نه، ۳۳۸ ص.؛ مصور، جدول.
فروست	دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر؛ شماره کتاب ۱۵۹. گروه فنی و مهندسی.
شابک	978-600-8257-22-6
وضعیت فهرست نویسی	فیفا
یادداشت	ص.خ. به انگلیسی:
یادداشت	A.Z. Hamadani, M. Shavar, M.T.Rezvan. Design and analysis of experiments (theory and applications) واژه نامه. کتابنامه: ص. [۳۳۷] - [۳۳۸].
یادداشت	نمایه.
موضوع	طرح های آزمایشی
موضوع	Experimental design
شناسه افزوده	شهسوار، امین، ۱۳۶۲ - رضوان، محمدتقی، ۱۳۶۱ - علیتقیان، مهدی، ۱۳۵۹ - ویراستار
شناسه افزوده	دانشگاه صنعتی اصفهان. مرکز نشر
رده بندی کنگره	۱۳۹۷ ط ۴۹ / QA۲۷۹
رده بندی دیویی	۰۰۱/۴۳۴
شماره کتابشناسی ملی	۵۲۲۷۱۷۲

حق چاپ برای مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان محفوظ است.

اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان - مرکز نشر - کدپستی ۸۴۱۵۲-۸۳۱۱۱ تلفن: ۰۳۱-۳۳۹۱۲۵۰۹-۱۰ دورنگار: ۳۳۹۱۲۵۵۲ برای خرید اینترنتی کلیه کتاب های منتشره مرکز نشر می توانید به وبگاه <http://publication.iut.ac.ir> مراجعه و یا مستقیماً از کتابفروشی مرکز نشر واقع در کتابخانه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان (تلفن ۳۳۹۱۳۹۵۲) خریداری فرمائید.

پیشگفتار

طراحی و تحلیل آزمایش‌ها، ابزار مفیدی برای استفاده بیشینه از اطلاعات به دست آمده از مطالعه روی فرایندهای فیزیکی و مدل‌های شبیه‌سازی رایانه‌ای در زمینه‌های مهندسی، کشاورزی، داروسازی، ریست‌شناسی، روانشناسی، جامعه‌شناسی و غیره است. این ابزار، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با ریژگ‌های از پیش تعیین شده را در نظر می‌گیرد که با تغییرات هدفمند روی متغیرهای ورودی یک سیستم را فرایند، اثرهای تغییرات را روی متغیر پاسخ اندازه‌گیری می‌کند. طراحی و تحلیل آزمایش‌ها را می‌توان در صنایع تولیدی و خدماتی، به طور سیستماتیک برای کاوش در فرایندهای جدید، کسب دانش از فرایندهای موجود و بهینه‌سازی فرایندها و همچنین شناسایی و تعیین عوامل اثر بر کیفیت محصولات و خدمات استفاده کرد و از آن برای بهبود کیفیت، قابلیت اطمینان و عملکردی در بازار جهانی بهره گرفت.

نگارندگان پس از مطالعه کتاب‌های مرجع با موضوع طراحی و تحلیل آزمایش‌ها و همچنین با تکیه بر بهره‌گیری از این ابزار در طرح‌های عملی تصمیم گرفتند تا این کتاب را به نگارش درآورند. این کتاب از نظر تئوری، مفاهیم آماری لازم را برای طراحی و تحلیل در نظر گرفته و با مرور برخی کاربردهای طراحی و تحلیل آزمایش در قالب مثال‌های موردی، از جنبه‌های عملی و کاربردی این ابزار، غافل نشده است. نرم‌افزار Minitab 13، یک ابزار قدرتمند و ساختارمند طراحی و تحلیل آزمایش‌هاست که می‌تواند نمودارهای گرافیکی قابل درکی را فراهم کند. همچنین بیشتر نمودارهای کتاب با استفاده از این نرم‌افزار ایجاد شده است. دو نمونه کاربردی از طراحی و تحلیل آزمایش‌ها به صورت گام به گام با نرم‌افزار Minitab 13 دنبال شده و تحلیل‌های مفیدی نیز بر خروجی این نرم‌افزار، افزوده شده است؛ بنابراین خوانندگان این کتاب با درک نظریه و جنبه‌های عملی طراحی و تحلیل آزمایش، با شیوه طراحی، تجزیه و تحلیل، گسترش و تفسیر نتایج یک آزمایش آشنا می‌شوند.

این کتاب، نخست مقدمات و مبانی اساسی در طراحی و تحلیل آزمایش‌ها را مرور می‌کند و سپس به معرفی آزمایش‌های یک عاملی ساده می‌پردازد و به دنبال آن، خواننده با طرح‌های بلوک‌بندی تصادفی، شامل به طور کامل تصادفی، مربع لاتین، مربع لاتین گریکو و ناقص

تصادفی شده آشنا می‌شود. بخش عمده و اصلی کتاب را معرفی آزمایش‌ها یا طرح‌های عاملی کامل، عاملی کسری، رویه‌های پاسخ و طرح‌های آشیانه‌ای تشکیل می‌دهند. در این کتاب، آزمایش‌های خاصی مانند تاگوچی و پلاکت-هورمن نیز معرفی شده‌اند. پوشش انواع آزمایش‌ها، به جامعیت کتاب افزوده است و نگارندگان قصد دارند تا در ویرایش‌های بعدی، نظریه‌های لازم برای آزمایش‌های طراحی‌شده با متغیرهای پاسخ دسته‌ای را نیز به کتاب اضافه کنند. مطالعه‌های موردی با موضوع‌های مختلف و آشنایی با نرم‌افزار در بخش پایانی کتاب، از نقاط برجسته این کتاب است. بهینه‌سازی زمان پرواز هلی‌کوپتر کاغذی به‌عنوان یک مطالعه موردی در این کتاب، این ویژگی دارد که می‌توان آن را در کلاس درس یا در یک کارگاه کاری به صورت کامل و با کمترین امکانات، بررسی و تحلیل کامل کرد.

نگارندگان صادقانه می‌دانند این کتاب، افزون بر دانشجویان رشته‌های مهندسی، داروسازی، کشاورزی و علوم پایه، به‌ویژه شیمی، برای مدیران کسب‌وکار و شاغلان در صنایع تولیدی و خدماتی و همچنین پژوهشگران در دنیای دانشگاهی، مفید و کاربردی باشد. گفتنی است که تمام حقوق مادی و معنوی این کتاب به صورت یکسان برای نگارندگان خواهد بود.

از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان و به‌ویژه آقای دکتر بهرام شریف‌نبی رئیس مرکز نشر این دانشگاه که موجبات داوری و چاپ این کتاب را فراهم آورده‌اند و از همه عزیزانی که در تهیه این کتاب ما را یاری کرده‌اند، به‌ویژه از آقای دکتر مهدی علینقیان به‌عنوان ویراستار علمی، خانم مهندس محبوبه شمس به‌عنوان ویراستار ادبی، انیم مهندس شقایق نصیری به‌عنوان صفحه‌آرا و نیز آقای مهندس محمدحسین عسگری طباطبائی به‌عنوان طراح جلد، کمال قدردانی و سپاس را داریم. امید است که خوانندگان عزیز کاستی‌ها را نادیده بگیرند و با نظرهای اصلاحی خود برای رفع کمبودها و نواقص، یاری‌دهنده باشند.

با تقدیم احترام

نگارندگان

بهار ۱۳۹۷

فهرست مطالب

۱:	مقدمات طراحی آزمایش‌ها	۱
۱-۱	رابطه بین آزمایش و طراحی	۱
۱-۱	طراحی آزمایش	۱۱
۱-۲	تاریخچه طراحی آزمایش‌ها	۱۲
۱-۲	مبانی اساسی در طراحی آزمایش‌ها	۱۲
۱-۳	۱-۴-۱ تصادفی سازی	۱۳
۱-۳	۲-۴-۱ تکرار	۱۵
۱-۳	۳-۴-۱ بلوک بندی	۱۵
۱-۴	۵-۱ کاربردهای طراحی آزمایش	۱۶
۱-۴	۶-۱ مراحل انجام یک طرح آزمایش	۱۷
۱-۴	۱-۶-۱ درک و بیان مسئله	۱۸
۱-۴	۲-۶-۱ انتخاب متغیر پاسخ	۱۸
۱-۴	۳-۶-۱ انتخاب عامل‌ها و سطح‌های آنها	۱۹
۱-۴	۴-۶-۱ انتخاب طرح آزمایش	۲۰
۱-۴	۵-۶-۱ انجام آزمایش و جمع‌آوری داده	۲۰
۱-۴	۶-۶-۱ تجزیه و تحلیل داده‌ها	۲۰
۱-۴	۷-۶-۱ نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها	۲۱
۱-۴	۷-۱ ساختار کتاب	۲۲
۱-۴	مسائل	۲۴
۲:	آزمایش‌های یک عاملی	۲۵
۲-۱	آزمایش یک عاملی دو سطحی	۲۵

۳۲	۲-۲ آزمایش یک عاملی با بیش از دو سطح
۳۳	۱-۲-۲ مدل‌های اثرهای تیمارها
۳۵	۲-۲-۲ بررسی کفایت مدل
۳۸	۳-۲-۲ تفسیر نتایج
۴۱	۴-۲-۲ روش‌های غیرپارامتری تحلیل واریانس
۵۰	مسائل

۵۵	۳: آزمایش‌های بلوک تصادفی شده
۵۵	۱-۳ بلوک بندی
۵۷	۲-۳ طرح بلوک بندی کامل تصادفی شده
۶۳	۳-۳ طرح مربع لاین
۶۶	۴-۳ طرح مربع لاین ترکیبی
۶۹	۵-۳ طرح‌های بلوک بندی ناقص تصادفی شده
۷۲	مسائل

۷۵	۴: آزمایش‌های چند عاملی (طرح‌های عاملی)
۷۵	۱-۴ تعاریف و مفهومی‌های اولیه
۸۱	۲-۴ آزمایش عاملی 2^k
۸۲	۱-۲-۴ آزمایش عاملی 2^2
۸۳	۲-۲-۴ نام‌گذاری استاندارد برای آزمایش‌های واحد
۸۴	۳-۲-۴ برآورد پارامتر
۸۴	۴-۲-۴ مجموع مربعات
۸۵	۵-۲-۴ روش‌های محاسبه کنتراست
۸۶	۶-۲-۴ الگوریتم یتس
۸۷	۷-۲-۴ تکرارها
۸۸	۸-۲-۴ آزمایش عاملی 2^3
۹۱	۹-۲-۴ رابطه‌های کلی برای آزمایش عاملی
۹۱	۱۰-۲-۴ طرح عاملی 2^k با یک تکرار
۱۰۱	۱۱-۲-۴ افزودن نقاط مرکزی به طرح
۱۰۳	۳-۴ آزمایش عاملی با بلوک
۱۰۷	۱-۳-۴ طراحی یک آزمایش آمیخته شده با بلوک

۱۱۰.....	۲-۳-۴ آزمایش یک عاملی
۱۱۰.....	۳-۳-۴ آزمایش عاملی با آمیختگی نسبی
۱۱۳.....	۴-۴ طرح عاملی با تکرار کسری
۱۲۰.....	۵-۴ عامل‌های با دو و چهار سطح
۱۲۳.....	۶-۴ آزمایش عاملی 3^k
۱۲۵.....	۱-۶-۴ آزمایش عاملی 3^2
۱۲۶.....	۲-۶-۴ آزمایش عاملی 3^3
۱۲۷.....	۳-۶-۴ طرح کلی 3^k
۱۲۷.....	۴-۶-۴ آمیختگی در طرح عاملی 3^k
۱۳۲.....	۵-۶-۴ طرح عاملی 3^k با تکرار کسری
۱۳۷.....	مسائل

۱۴۱.....	۵: آزمایش‌های بلوک‌ها دو مرحله شده
۱۴۱.....	۱-۵ مصورسازی پاسخ
۱۴۳.....	۲-۵ مدل‌های مرتبه اول
۱۴۴.....	۳-۵ طرح‌های مرتبه اول
۱۴۶.....	۴-۵ تحلیل داده‌های مدل مرتبه اول
۱۴۹.....	۵-۵ مدل‌های مرتبه دوم
۱۵۳.....	۶-۵ طرح‌های مرتبه دوم
۱۵۷.....	۷-۵ تحلیل مدل‌های مرتبه دوم
۱۶۰.....	۸-۵ آزمایش‌های ترکیبی
۱۶۲.....	۱-۸-۵ طرح‌های آزمایش ترکیبی
۱۶۴.....	۲-۸-۵ مدل‌های طرح‌های ترکیبی
۱۶۸.....	مسائل

۱۷۳.....	۶: طرح آشیانه‌ای
۱۷۳.....	۱-۶ عامل‌های متقاطع و آشیانه‌ای
۱۷۶.....	۲-۶ طرح‌های آشیانه‌ای سلسله‌مراتبی
۱۷۸.....	۳-۶ طرح‌های آشیانه‌ای کرت‌های خردشده
۱۸۲.....	۱-۳-۶ ساختار طرح کرت‌های خردشده سستی
۱۸۵.....	۴-۶ تصادفی‌سازی محدود

۱۸۹	۵-۶ تحلیل طرح‌های آشیانه‌ای سلسله‌مراتبی
۱۹۴	۶-۶ تحلیل طرح‌های کرت‌های خردشده
۱۹۸	مسائل
۲۰۹	۷: آزمایش‌های خاص
۲۰۹	۱-۷ طرح‌های پلاکت-بورمن
۲۱۳	۲-۷ طرح‌های تاگوچی
۲۲۳	مسائل
۲۲۵	۸: مطالعات موردی
۲۲۵	۱-۸ بهینه‌سازی جراحی بدن با کیفیت رادیوگرافی
۲۲۵	۱-۱-۸ هدف آزمایش
۲۲۵	۲-۱-۸ انتخاب متغیر پاسخ
۲۲۵	۳-۱-۸ فهرست عامل‌ها و اثرات آنها مورد انتظار برای آزمایش
۲۲۶	۴-۱-۸ سطح پارامترها و محدوده آنها
۲۲۶	۵-۱-۸ تصمیم‌گیری درباره طراحی و تعداد آزمایش‌های تجربی
۲۲۶	۶-۱-۸ مولدهای طراحی و ساختار آمیخته‌ای
۲۲۷	۷-۱-۸ ماتریس طراحی بدون کد با مقادیر پاسخ
۲۲۷	۸-۱-۸ تحلیل و تفسیر نتایج
۲۲۹	۹-۱-۸ آزمایش‌های تأییدی
۲۳۰	۲-۸ کاهش تغییرپذیری با استفاده از روش طراحی تجربی آزمایش
۲۳۰	۱-۲-۸ هدف آزمایش
۲۳۰	۲-۲-۸ انتخاب پاسخ
۲۳۰	۳-۲-۸ فهرست پارامترهای فرایند و سطح‌های آنها
۲۳۰	۴-۲-۸ تصمیم‌گیری درباره طراحی و تعداد آزمایش‌های لازم
۲۳۱	۵-۲-۸ مولدها
۲۳۱	۶-۲-۸ ماتریس طراحی کدگذاری‌شده و کدگذاری‌نشده با مقادیر پاسخ
۲۳۱	۷-۲-۸ تحلیل و تفسیر نتایج
۲۳۴	۸-۲-۸ تعیین تنظیمات بهینه برای کاهش تغییرپذیری
۲۳۴	۹-۲-۸ آزمایش‌های تأییدی
۲۳۴	۱۰-۲-۸ اهمیت کار انجام‌شده

- ۳-۸ کاهش چشمگیر نرخ ضایعات با استفاده از آزمایش‌های عاملی کسری..... ۲۳۵
- ۱-۳-۸ طبیعت مسئله..... ۲۳۵
- ۲-۳-۸ هدف آزمایش..... ۲۳۵
- ۳-۳-۸ انتخاب پاسخ..... ۲۳۵
- ۴-۳-۸ فهرست پارامترهای فرایندی و سطح آنها..... ۲۳۵
- ۵-۳-۸ ماتریس طراحی کدگذاری با مقادیر پاسخ برای آزمایش..... ۲۳۶
- ۶-۳-۸ تحلیل و تفسیر نتایج..... ۲۳۷
- ۷-۳-۸ اجراهای تأییدی..... ۲۳۸
- ۴-۸ بهینه‌سازی زمان پرواز یک هلی‌کوپتر کاغذی..... ۲۳۸
- ۱-۴-۸ هدف آزمایش..... ۲۳۸
- ۲-۴-۸ توصیف آزمایش..... ۲۳۸
- ۳-۴-۸ انتخاب پاسخ..... ۲۳۹
- ۴-۴-۸ فهرست پارامترهای طراحی و سطح‌های آنها..... ۲۳۹
- ۵-۴-۸ تصمیم‌گیری درباره طراحی و ماتریس طراحی آزمایش..... ۲۳۹
- ۶-۴-۸ تحلیل آماری و تفسیر نتایج..... ۲۴۰
- ۷-۴-۸ مدل پیش‌بینی زمان پرواز..... ۲۴۳
- ۸-۴-۸ اجراهای تأییدی..... ۲۴۳
- ۹-۴-۸ اهمیت کار انجام‌شده..... ۲۴۳
- ۵-۸ بهینه‌سازی فرایند اتصال مفتول با استفاده از طراحی آزمایش..... ۲۴۴
- ۱-۵-۸ توصیف آزمایش..... ۲۴۴
- ۲-۵-۸ هدف آزمایش..... ۲۴۴
- ۳-۵-۸ انتخاب پاسخ..... ۲۴۴
- ۴-۵-۸ شناسایی متغیرهای فرایند برای آزمایش..... ۲۴۴
- ۵-۵-۸ تصمیم‌گیری درباره طراحی و چیدمان آزمایش..... ۲۴۵
- ۶-۵-۸ تحلیل و تفسیر آماری..... ۲۴۶
- ۷-۵-۸ گسترش مدل بر اساس اثرهای اصلی و اثرهای متقابل مهم..... ۲۴۸
- ۸-۵-۸ نتیجه‌گیری..... ۲۴۸
- ۶-۸ تمرین برای طراحی آزمایش با استفاده از قلاب سنگ..... ۲۴۹
- ۱-۶-۸ هدف آزمایش..... ۲۴۹
- ۲-۶-۸ انتخاب پاسخ..... ۲۴۹

۲۴۹	۸-۶-۳ فهرست عامل‌ها و سطح آنها برای آزمایش
۲۵۰	۸-۶-۴ تصمیم‌گیری درباره طراحی و چیدمان آزمایش
۲۵۰	۸-۶-۵ تحلیل و تفسیر آماری نتایج
۲۵۲	۸-۶-۶ تبیین تنظیمات بهینه عامل‌ها
۲۵۳	۸-۶-۷ آزمایش تأییدی
۲۵۳	۸-۶-۸ اهمیت کار انجام‌شده
۲۵۳	۸-۷-۷ بهینه‌سازی طول عمر لوله مغزی با استفاده از طراحی آزمایش
۲۵۴	۸-۷-۷-۱ نخستین تلاش شرکت برای آزمایش
۲۵۵	۸-۷-۷-۲ دین تلاش شرکت برای طراحی آزمایش
۲۶۳	۸-۷-۷-۳ اهمیت مطالعه
۲۶۳	۸-۸-۸ بهینه‌سازی راینند - رسکاری نقطه‌ای
۲۶۶	۸-۸-۱-۱ تحلیل آماری بیج آزمایش
۲۷۰	۸-۸-۲ تحلیل تابع زبان رای و برگی‌های LBT
۲۷۰	۸-۸-۳ اهمیت مطالعه
۲۷۱	۹: طراحی آزمایش با کمک نرم‌افزار Minitab
۲۷۱	۹-۱-۱ آشنایی کلی با نرم‌افزار Minitab
۲۷۱	۹-۲-۲ تبیین مختصر پنجره‌های مختلف Minitab
۲۷۲	۹-۲-۱-۱ پنجره Session
۲۷۲	۹-۲-۲-۱ پنجره Data
۲۷۲	۹-۲-۳-۱ پنجره Project Manager
۲۷۳	۹-۳-۱ آشنایی با منوهای مختلف Minitab
۲۷۳	۹-۳-۱-۱ منوی Data
۲۷۳	۹-۳-۲-۱ منوی Calc
۲۷۳	۹-۳-۳-۱ منوی Stat
۲۷۴	۹-۳-۴-۱ منوی Graph
۲۷۴	۹-۳-۵-۱ منوی Assistant
۲۷۴	۹-۴-۱ چگونگی طراحی آزمایش با استفاده از نرم‌افزار Minitab
۲۷۵	۹-۴-۱-۱ استفاده از ابزارهای گرافیکی مختلف
۲۷۵	۹-۴-۲ تحلیل واریانس

۲۷۹	۳-۴-۹ طراحی و تحلیل آزمایش ها
۲۹۷	۴-۴-۹ اصلاح طرح
۲۹۸	۵-۴-۹ نمایش طرح
۲۹۸	۶-۴-۹ تعیین اندازه نمونه و توان آزمون
۳۰۲	۵-۹ اجرا و تحلیل دو طرح آزمایش با استفاده از Minitab
۳۰۲	۱-۵-۹ نمونه‌ای از یک طرح عاملی
۳۰۶	۲-۵-۹ نمونه‌ای از طرح تاگوچی و رویه پاسخ
۳۱۱	پیوست
۳۲۱	واژه‌نامه
۳۳۳	واژه‌یاب
۳۳۷	منابع مورد استفاده