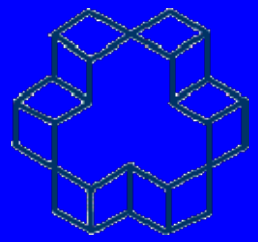
دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
دانشکده مهندسی و علم مواد



شبیه سازی در مهندسی مواد

جلسه چهارم

(طراحی آزمایش ها)

دکتر رضا اسلامی فارسانی

مقدمه

بشر از بدو خلقت در صدد تعبیر رویدادهای طبیعی و توجیه وقایع اطراف خود بوده و برای آگاهی از مسائل به روش های گوناگونی متوسل گردیده است. روش از پیش دانسته (فارغ از تجربه) و به عبارت دیگر اتکا به آنچه از قبل توسط دیگران بیان گردیده و فاقد تناقض با عقل و منطق است، به منظور کسب آگاهی مورد استفاده بشر بوده است. اما موجه ترین و اصولی ترین راه شناخت و کشف مجهولات، روش علمی است.

مقدمه

افلاطون یکی از اولین دانشمندانی است که لزوم داشتن روش و قاعده را برای کشف مجهولات مورد تأکید قرار داد. ارسطو با تدوین منطق، روش تفکر صحیح برای کسب نتایج معتبر را بوجود آورد. روش های تحقیق علمی در اثر کوشش های دکارت، بیکن و داروین تدوین شدند. بنابر عقیده این دانشمندان، لازمه آگاهی از قوانین طبیعت و رویدادهای آن و به عبارت دیگر راه رسیدن به حقیقت، مشاهده عینی در طبیعت و قضاوت منطقی در ذهن است.

مقدمه

علم، راه شناخت طبیعت و حقیقت نسبی است. به زبان ساده، علم عبارت است از کشف حقایق موجود در جهان. معمولاً برای کشف یک حقیقت ابتدا فرض یا فرض هایی مطرح می شود و سپس برای قبول یا رد آنها آزمایشی انجام می شود. اگر آزمایش مزبور فرض را تأیید کرد، صحت فرضیه مورد قبول واقع می شود. چنانچه فرضیه ای چندین بار تأیید شود، به صورت یک تئوری تدوین می شود.

ارکان روش علمی

۱- مشاهده

آنچه قابل اندازه گیری نیست مورد بررسی علمی قرار نمی گیرد. مشاهده باید تکرار پذیر باشد، در غیر این صورت از قلمرو علم خارج است.

۲- تعریف مسأله یا پرسش

تعریف مسأله و پرسش مناسب، هدف تحقیق را مشخص می کند. هدف، مقصدی را تعیین می کند که محقق به داوری آن می پردازد و بنابراین مسیر تلاش و زمینه کار را روشن می سازد.

ارکان روش علمی

۳- فرضیه سازی

محقق پس از مشاهده و پرسش، حدس و پندارهایی را برای پاسخ قائل می شود و این نقطه تمایز بین فرد عامی و محقق است.

۴- استقراء و آزمایش

جمع آوری شواهد بر له یا علیه فرضیه و به آزمون گذاشتن ارزش حدس های علمی، رکن چهارم روش علمی است.

۵- تئوری سازی

تئوری سازی بیان نتایج توأم با احتمال وقوع آنهاست.

تعریف آزمایش

آزمایش یک عمل طرح ریزی شده است که برای رد یا قبول یک فرض یا کشف واقعیتی روی تعدادی فرد انجام می شود.

کلمه "فرد" جامعیت دارد و به کوچکترین واحدی که مورد اندازه گیری و بررسی قرار می گیرد، مانند یک انسان، یک دام، قطعه ای از برگ، یک سلول، قطعه ای از یک زمین، یک شهر، یک کارخانه، یک واشر، یک لیتر پساب و ... اطلاق می شود.

مفاهیم پایه

به مجموعه ای از افراد که حداقل دارای یک وجه مشترک باشند، جامعه گفته می شود. نمونه، بخشی از جامعه است که معرف آن می باشد.

اغلب آزمایش ها جهت بررسی عملکرد یک سیستم نسبت به تغییرات در برخی از عوامل موثر بر سیستم انجام می شوند.

اهداف آزمایش شامل بهینه کردن عملکرد سیستم و توصیف سیستم است

تعریف طراحی آزمایش

طراحی آزمایش (Design of Experiments=DOE) یا Design & Analysis of Experiments، روشی آماری برای ارزیابی اثرات طرز عمل های (Treatments) مختلف بر روی یک متغیر پاسخ (Response Variable) است. مزایای طراحی آزمایش، صرفه جویی در زمان، تلاش ها و هزینه ها می باشد.

به ارائه چیدمانی از پارامترها با مقادیر مختلف به گونه ای خاص به صورت طرح های ماتریسی در کنار هم برای انجام یک سری آزمایشات جهت بررسی پارامترها و تعاملات بین آنها طراحی آزمایش گویند.

تعریف طراحی آزمایش

اگر پاسخ (Responce) یا خروجی سیستم تنها به یک عامل (Factor) بستگی داشته باشد، با ساده ترین حالت ممکن مواجه هستیم. در این حالت عملکرد سیستم را در سطوح مختلف عامل مورد نظر اندازه گیری نموده و یک منحنی از میان نتایج آن می گذرانیم. در صورتی که بیش از یک عامل داشته باشیم، نمی توانیم به این صورت عمل کنیم.

اهداف طراحی آزمایش

یک فرآیند را می توان به جعبه ای سیاه تشبیه کرد که از اتفاقات درون آن اطلاعاتی در دست نیست و معمولاً در آن با چند پارامتر قابل کنترل به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند و یک یا چند پاسخ خروجی مواجه هستیم. هدف در طراحی آزمایش آن است که ارتباط خروجی ها با ورودی ها (پاسخ ها و پارامترها) با حداقل خطا در قالب یک مدل ریاضی بدست آید. ضمن این که ممکن است در فرآیند، عوامل غیرقابل کنترل نظیر خطای نیروی انسانی، ماشین آلات، سیستم های اندازه گیری و عوامل محیطی وجود داشته باشند. برخی از عوامل غیرقابل کنترل مانند دما و رطوبت پیوسته هستند و برخی نظیر تنوع ماشین آلات، فرسودگی تدریجی ماشین آلات و تنوع اپراتورها، گسسته هستند.

اهداف طراحی آزمایش

- تعیین پارامترهایی که بیشترین اثر را در پاسخ دارند.

- تنظیم پارامترهای موثر بطوری که پاسخ گرفته شده نزدیک به مقدار مطلوب باشد.

- تعیین میزان مجاز تغییرات پارامترهای موثر قابل کنترل به طوری که اثر پارامتر غیرقابل کنترل، حداقل باشد.

- کاهش هزینه های آزمایش، کاهش زمان نتیجه گیری و قابل اعتماد کردن فرآیند.

اهداف طراحی آزمایش

بعد از طراحی آزمایش، نوبت به بهینه سازی فرآیند می رسد. جهت بهینه سازی فرآیند باید هدف مشخص باشد. به عنوان مثال اگر هدف میزان محصول باشد، هر چه میزان محصول بیشتر باشد، بهتر است. اما اگر هدف اندازه ابعاد یک قطعه باشد، محصولاتی که حداقل تغییرات از اندازه مورد نظر را داشته باشند، مورد نظر هستند و اندازه های بزرگتر و یا کوچکتر مورد قبول نیستند. همچنین ممکن است هدف حذف مواد آلاینده از یک پساب باشد که در این صورت هر چه غلظت این مواد کمتر باشد، بهتر است.

اصول اساسی طراحی آزمایش

- تکرار آزمایش (Replication)
- تصادفی سازی (Randomization)
- بلوک بندی (Blocking)

تکرار آزمایش

تکرار آزمایش اولاً میزان خطا را تعیین می کند، ثانیاً اگر از میانگین داده ها جهت تخمین اثر هر عامل استفاده شود، آنگاه تکرار پاسخ باعث می شود تا اثر هر پارامتر دقیق تر تعیین شود.

تصادفی سازی

تصادفی سازی اشاره به ترتیب انجام آزمایش ها در یک طرح دارد. با تخصیص شماره به هر یک از آزمایش ها و استفاده از جدول اعداد تصادفی و یا هر روش دیگر که اعداد تصادفی تولید می کند، می توان تصادفی سازی را به اجرا در آورد. تصادفی سازی مخاطره یا ریسک ایجاد خطا در نتایج به دلیل وجود عامل های غیرقابل کنترل یا ناشناخته را به حداقل می رساند.

بلوک بندی

در صورت وجود محدودیت های مالی یا فیزیکی از بلوک بندی استفاده می کنیم. آزمایش به بخش های مختلفی تقسیم شده که هر بخش توسط عاملی که نمی توان آن را تصادفی سازی نمود، تعریف می شود. مثلاً ممکن است مواد اولیه ای که برای انجام آزمایش استفاده می شود به میزان کافی موجود نباشد تا بتوان آزمایش را کامل نمود. در چنین شرایطی می توان بلوک بندی نمود و بخشی از آزمایش ها را با استفاده از یک سری مواد و بقیه را با سری های دیگر انجام داد.

مراحل طراحی آزمایش

قبل از طراحی آزمایش، محقق باید ایده روشنی از آنچه که می خواهد انجام دهد، داشته باشد. برای این منظور روش کار شامل مراحل ذیل است:

۱- تشخیص و بیان مسئله
۲- انتخاب عوامل و سطح ها
۳- انتخاب متغیر پاسخ
۴- انتخاب طراحی آزمایش
۵- انجام آزمایش ها و جمع آوری داده ها
۶- آنالیز و تحلیل داده ها
۷- نتیجه گیری و پیشنهادها

مراحل طراحی آزمایش

۱- تشخیص و بیان مسئله (تعریف دقیق و مشخص پدیده)

شاید در ابتدا این مسئله خیلی ساده به نظر برسد. اما در اغلب موارد بسیاری از جنبه های مسئله مشخص نیستند و مهم است که تمام قسمت های مربوط و تاثیرگذار در طراحی آزمایش شرکت کنند. یک بیان روشن از مسئله معمولاً به درک بهتر از پدیده و در نهایت حل مشکل کمک می کند.

مراحل طراحی آزمایش

۲- انتخاب عوامل و تعیین سطوح

بعد از تعریف مسئله پارامترهایی که باید مورد آزمایش قرار گیرند، تعیین می شوند و محدوده تغییرات آنها مشخص می شود. همچنین تعداد سطوح هر پارامتر باید تعیین شود. نحوه تنظیم و کنترل این پارامترها به میزان مطلوب باید به خوبی درک شود. مهم این است که پارامترهای اصلی بررسی شوند. همچنین اگر ایجاد تغییرات در برخی پارامترها امکان ندارد، چنین پارامترهایی از آزمایشات حذف شوند. در مراحل اولیه، وقتی که هدف کاهش تعداد عوامل می باشد، بهتر است از دو سطح استفاده شود.

مراحل طراحی آزمایش

۳- انتخاب متغیر پاسخ

پارامتری به عنوان متغیر پاسخ انتخاب می شود که بتواند اطلاعات مفیدی در مورد فرآیند مورد آزمایش بدهد. اغلب میانگین پاسخ ها یا انحراف معیار یا هر دو، متغیر پاسخ می باشند. گاهی اوقات ممکن است چند متغیر پاسخ وجود داشته باشد. قابلیت اندازه گیری خطا همچنین یک عامل مهم است. اگر قابلیت اندازه گیری خطا ضعیف باشد، تنها اثرات عواملی که تاثیر زیادی دارند (آن هم با تکرار آزمایش ها) نشان داده می شوند.

مراحل طراحی آزمایش

۴- انتخاب طراحی آزمایش

اگر سه مرحله اول بطور صحیح انجام شوند، انجام این مرحله ساده است. انتخاب طراحی آزمایش شامل تعیین تعداد تکرار، انتخاب آزمایش های مناسب و تعیین تصادفی بودن یا بلوک بندی آزمایش ها است.

مراحل طراحی آزمایش

۵- انجام آزمایش ها و جمع آوری داده ها

در هنگام آزمایش ها باید بسیار دقت شود تا فرآیند کاملاً تحت کنترل باشد و همه چیز طبق طرح انجام شود. خطا در این مرحله صحت نتایج بدست آمده توسط آزمایش ها را مخدوش می کند.

مراحل طراحی آزمایش

۶- آنالیز و تحلیل داده ها

روش های آماری معمولاً جهت آنالیز داده ها استفاده می شود.
همچنین استفاده از نرم افزارهای رسم منحنی نیز توصیه می شود.
رسم نمودار نقش مهم و اساسی در آنالیز داده ها دارد. لازم بذکر است که روش های آماری نمی توانند ثابت کنند که یک عامل اثر ویژه ای دارد، بلکه از آنها به عنوان راهنما استفاده می شود. روش های آماری به همراه دانش مهندسی باعث نتیجه گیری صحیح و خوب می شوند.

مراحل طراحی آزمایش

۷- نتیجه گیری و پیشنهادها

بعد از آنالیز داده ها محققان باید از نتایج بدست آمده بطور عملی بهره برداری نمایند و پیشنهادهای اساسی جهت فرآیند ارائه دهند. روش های گرافیکی در این مرحله می توانند بسیار مفید باشند. آزمایشات بعدی و تاییدی، صحت نتیجه گیری انجام شده را تایید می کنند.

روش های طراحی آزمایش

- روش بررسی یک عامل در هر زمان (One Factor at a Time)
- طراحی آزمایش عاملی یا طرح عاملی کامل (Full Factorial Design)
- طرح های غربالی شامل:

الف- طرح پلاکت- برمن (Plackett-Burman Design)

ب- روش رویه پاسخ (Response Surface Method)

ج- روش ترکیبی

د- روش تاگوچی (Taguchi)

روش بررسی یک عامل در هر زمان (OFAT)
One Factor At a Time

در این روش هر عامل به تنهایی و در حالی که سایر عوامل ثابت نگهداشته شده اند، تغییر داده می شود. در این روش می توان ایده ای در مورد عکس العمل های سیستم نسبت به تغییرات در عوامل مختلف بدست آورد، ولی موثرترین روش انجام آزمایش نیست. با استفاده از این روش می توان نتایج آماری قابل قبول بدست آورد، ولی شناسایی اثرات متقابل امکان پذیر نمی باشد.

مثال: می خواهیم اثر دو عامل فشار و دما بر استحکام سیم در فرآیند تولید آن را بررسی کنیم. هدف به حداکثر رساندن قدرت استحکام می باشد و دو سطح T_1 و T_2 برای دما و دو سطح P_1 و P_2 برای فشار انتخاب شده است.

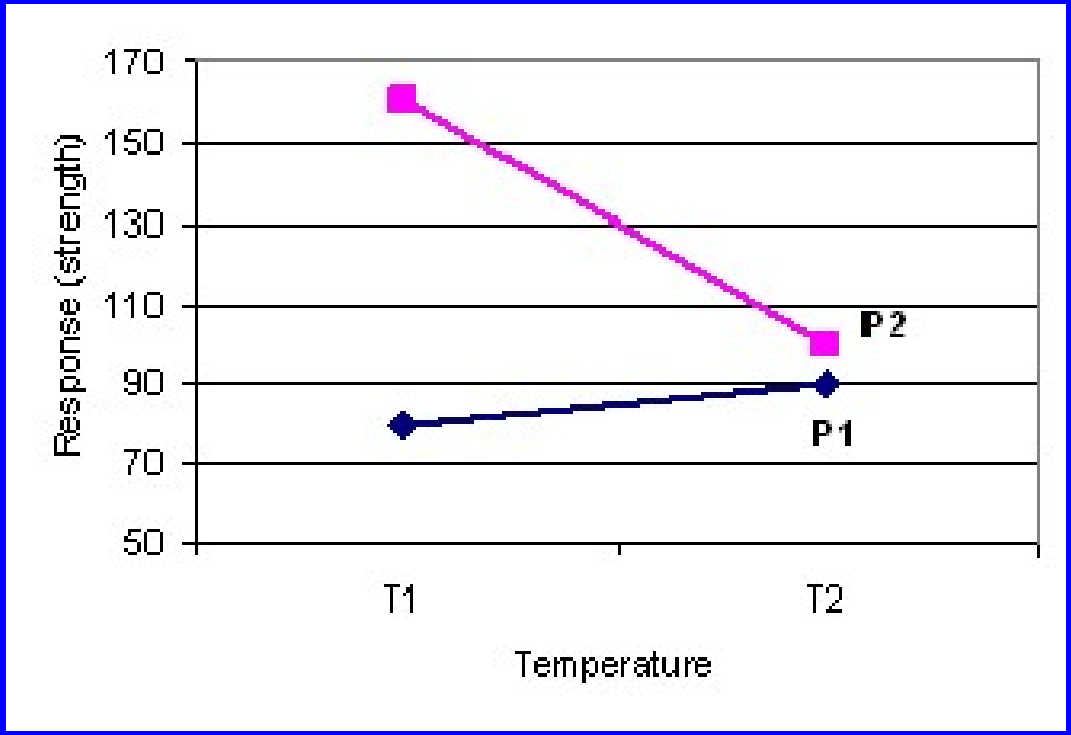
فشار	دما	پاسخ
P_1	T_1	۸۰
P_1	T_2	۹۰

با توجه به جدول فوق، سطح T_2 برای دما انتخاب می شود.

فشار	دما	پاسخ
P_1	T_2	۹۰
P_2	T_2	۱۰۰

با توجه به جدول فوق نتیجه می گیریم که بهترین تنظیم P_2T_2 است، اما ترکیب P_2T_1 هنوز آزمایش نشده است. با انجام این آزمایش در می یابیم که درجه حرارت و فشار اثر متقابل دارند و نتیجه فوق نادرست است. این اثر در شکل نشان داده شده است:

با انجام آزمایش P_2T_1، در می یابیم که درجه حرارت و فشار اثر متقابل دارند و نتیجه فوق نادرست است. این اثر در شکل نشان داده شده است:



واضح است که با انجام کلیه حالت های ممکن، چنین مشکلی پیش نخواهد آمد.

طراحی آزمایش عاملی یا طرح عاملی کامل (FFD)

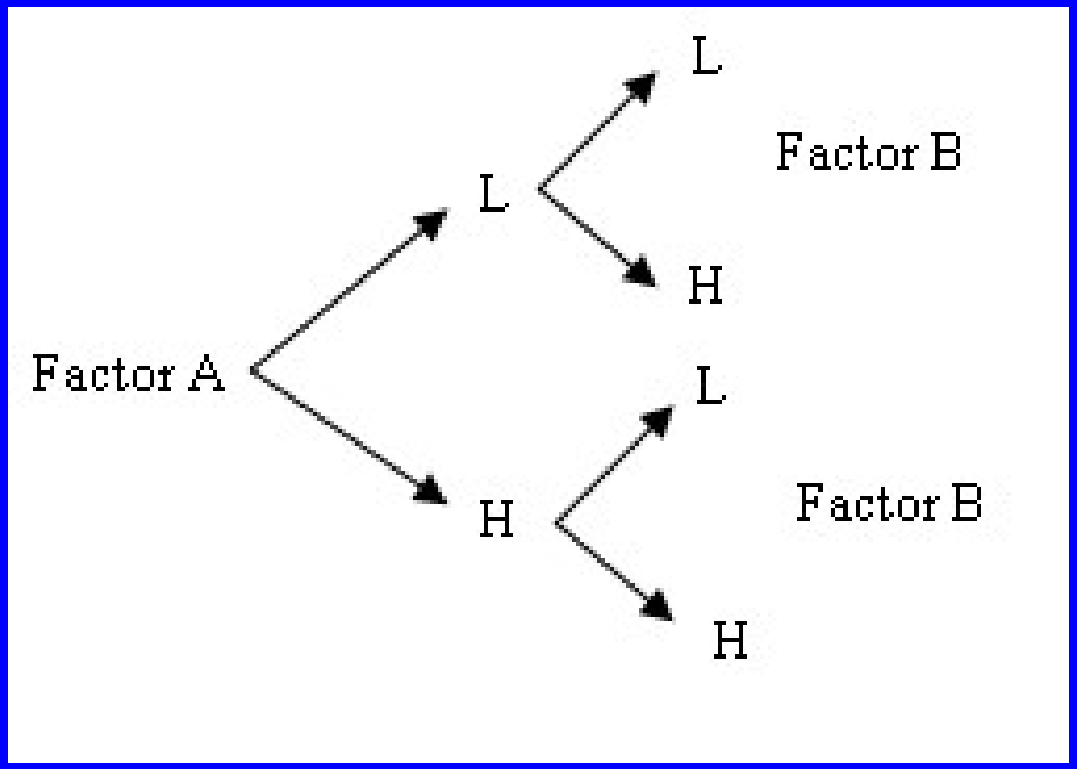
Full Factorial Design

در این طرح تمامی حالت های ممکن با توجه به تعداد سطوح و عوامل، آزمایش می شوند و تعداد آزمایشات از رابطه زیر حاصل می شود.

$$\text{تعداد آزمایشات} = (\text{تعداد سطح})^{\text{تعداد عامل}}$$

در صورتی که تعداد عوامل کم باشد، FFD بهترین انتخاب است. در آزمایشاتی که تعداد عوامل و سطوح زیاد است این طرح زمان بر و پرهزینه است.

در حالت FFD، نمودار درختی برای دو عامل A و B با دو سطح بالا (H) و پایین (L) به صورت زیر است.



با توجه به نمودار درختی، همه ترکیبات آزمایش در جدول زیر ارائه شده است:

B	A	اجراء
L	L	۱
H	L	۲
L	H	۳
H	H	۴

طراحی آزمایش با سطوح متفاوت پارامترها

در طرح عاملی کامل، عموماً تعداد سطوح هر پارامتر یکسان است. در برخی موارد ممکن است شرایط آزمایش این گونه ایجاب کند که سطح هر پارامتر با دیگر پارامترها متفاوت باشد. در چنین شرایطی طراحی آزمایش به صورت مخلوط خواهد بود. بنابراین در طراحی آزمایش مخلوط هر پارامتر می تواند دارای مقادیر مخصوص به خود (تعداد سطوح خاص خود) باشد. در این حالت ممکن است همه آزمایش ها و یا کسری از آنها براساس یکی از روش های طراحی آزمایش انجام شوند.

طرح های غربالی (Screening Designs)

با افزایش تعداد عامل ها در یک طرح عاملی، هزینه، زمان و دردسر کنترل به علت افزایش تعداد آزمایش های مورد نیاز به سرعت افزایش می یابد، لذا در مواردی لازم است از تعداد اجراها کاسته شود. در این حالت از فنون طراحی که بطور اقتصادی انجام آزمایش هایی با چندین عامل را ممکن می سازند، استفاده می شوند. این طرح ها را طرح های غربالی می نامند.

طرح های غربالی (Screening Designs)

طرح های غربالی را می توان در مورد هر تعداد عامل (معمولاً چهار عامل یا بیشتر) که در یک آزمایش مقدور باشد، استفاده نمود. به عبارت دیگر با طرح های غربالی تنها کسری از آزمایش ها انجام می شوند. هدف استفاده از این گونه طرح ها، غربال کردن عامل هایی است که نیاز به بررسی بیشتری دارند.

طرح های غربالی

تعداد آزمایش های مورد نیاز در طرح های غربالی، کوچکترین تعداد آزمایش هایی هستند که اطلاعات قابل توجهی برای ما فراهم می سازند. این میزان صرفه جویی اقتصادی، هزینه هایی را نیز به همراه دارد، ولی میزان این هزینه ها در مقایسه با اطلاعات کسب شده ناچیز محسوب می گردد.

در جدول زیر به منظور ایده گرفتن در مورد قدرت طرح های غربالی، مقایسه ای بین تعداد آزمایش های مورد نیاز در طرح عاملی کامل و طرح غربالی آمده است.

تعداد عامل ها	طرح عاملی کامل	کوچکترین طرح غربالی
4	16	8
5	32	8
6	64	8
7	128	8
11	2048	12
15	32،768	16
19	524،288	20
23	8،388،608	24
27	134،217،728	28
31	2،147،483،648	32

طرح پلاکت- برمن

(Plackett-Burman Design)

طرح های عاملی کسری دو سطحی برای مطالعه K=N-1 متغیر با N اجرا هستند که در آن، N مضرب ۴ است. اگر N از توان ۲ باشد، این طرح ها همان طرح های عاملی کسری هستند. اما برای N مساوی ۱۲، ۲۰، ۲۴، ۲۸ و ۳۲، گاهی طرح های پلاکت- برمن بکار می روند. این طرح در مقایسه با سایر طرح های آزمایش به دلیل کم بودن بیش از حد آزمایش ها ضعیف تر است. اما با این حال در مواردی بکار می رود.

روش رویه پاسخ (RSM)

(Response Surface Method)

این روش، مجموعه ای از فنون ریاضی و آماری است که برای مدل کردن و تحلیل مسائلی که پاسخ مورد نظر تحت تاثیر چندین متغیر قرار می گیرد، مفید بوده و هدف آن بهینه سازی این پاسخ است. پاسخ در روش مذکور به صورت یک رویه یکپارچه ارائه شده و اغلب از یک چند جمله ای درجه اول یا دوم برای مدل کردن پاسخ استفاده می شود. در اکثر مسائل مربوط به روش رویه پاسخ، ارتباط بین پاسخ و متغیرهای مستقل نامعلوم است. پس اولین قدم در رویه پاسخ، یافتن تقریبی مناسب برای ارتباط واقعی موجود بین پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل است.

روش ترکیبی

طرح های ترکیبی، نوع خاصی از طرح های رویه پاسخ هستند که پارامترها، اجزاء یک ترکیب هستند و پاسخ نیز تابعی از ترکیبات است. در این روش بین پارامترهای ورودی، رابطه ای معمولاً به صورت خطی وجود دارد که منجر به مقید و محدود شدن ناحیه کار می شود. روش طراحی ترکیبی بیشترین کاربرد را در تحقیقات فرآیندهای شیمیایی دارد.

روش تاگوچی

(Taguchi)

در این روش پارامترها به دو دسته قابل کنترل و غیرقابل کنترل تقسیم می شوند. هدف روش تاگوچی دست یابی به تنظیمی با حداقل پراکندگی در جواب بهینه است. یکی از ایرادات روش تاگوچی، در نظر نگرفتن تعامل اثر بین فاکتورهای اصلی است. در فرآیندهایی که پارامتر غیرقابل کنترل وجود ندارد نیز لزومی به استفاده از این طرح نیست.