

مقایسه طراحی آزمایش‌ها به روش‌های تاگوچی و سنتی و شاینین با یکدیگر: یک مطالعه موردی

علیرضا مومیوند^{1*}، آرش شاهین² و امیرحسین نوارچیان³

¹ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد نجف‌آباد

² دانشیار گروه مدیریت - دانشگاه اصفهان

³ دانشیار گروه مهندسی شیمی - دانشگاه اصفهان

(تاریخ دریافت 87/11/12، تاریخ دریافت اصلاح‌شده 90/2/11، تاریخ تصویب 90/7/23)

چکیده

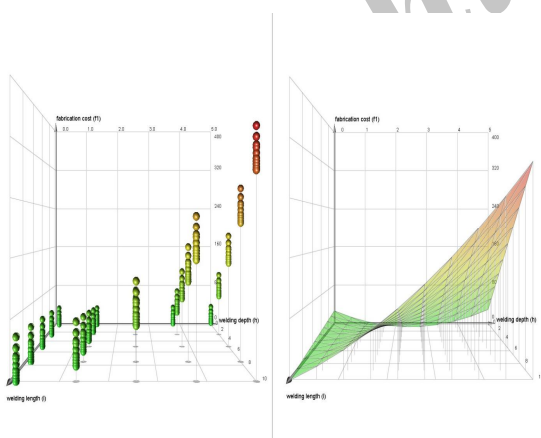
سه روش تاگوچی، سنتی و شاینین به عنوان روش‌های طراحی آزمایش‌ها قابلیت ریشه‌یابی و حل مشکل‌های کیفی و ایجاد بهبود را دارند. بهره‌گیری از این روش‌ها مستلزم شناخت بیشتر نقاط قوت و ضعف آنها است. شناسایی زوایای این روش‌ها با مقایسه در قالب یک مطالعه موردی درک عمیق‌تری را به همراه دارد.

در این مطالعه روش‌های مذکور در شرکت روز نوش کرمانشاه بعد از اجرا به کمک معیارهای کمی و ذهنی (معیارها با توجه به نظرهای کارشناسان این شرکت امتیازدهی شده است) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج نهایی مقایسه نشان‌دهنده امتیاز بیشتر روش سنتی از روش‌های تاگوچی و شاینین و امتیاز بیشتر روش تاگوچی از روش شاینین است. در این مطالعه، با توجه به شرایط شرکت، معیارها و وزن‌های اختصاصی به هر معیار مشخص شده است که به ترتیب روش‌های سنتی، تاگوچی و شاینین اولویت اجرا دارند.

واژه‌های کلیدی: طراحی آزمایش‌ها، روش تاگوچی، روش سنتی، روش شاینین، مقایسه روش‌ها

مقدمه

هیورسیتیکی مانند الگوریتم ژنتیک و غیره توانایی قابل توجهی را ارائه می‌دهند. [1]



شکل 1: طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ (سمت راست) و فول فاکتوریل (سمت چپ)

اما هنوز روش‌های معمولی طراحی آزمایش‌ها، در صورت وجود داده‌های کافی، از قوت مناسب بهره‌مند هستند. از طرف دیگر با مقایسه این روش‌ها امکان کشف نقاط قوت و ضعف هر روش و در نتیجه ارتقاء روش‌ها

روش طراحی آزمایش‌ها یک ابزار قوی برای افزایش کیفیت محصول‌ها و رفع علل ایجاد زیان‌های کیفی به ویژه در مراحل قبل از تولید محصول‌ها و یا ارائه خدمات‌ها است. با توجه به اینکه در ایران در زمینه فرایند طراحی اثرزاد تولید و چگونگی اثرهای فاکتورهای طراحی و تولید بر مشخصه‌های محصول، شناخت کافی وجود ندارد و همچنین با در نظر گرفتن نیاز بالای محصولات و خدمات به کیفیت، در ورود به میدان رقابتی، استفاده از تکنیک‌های طراحی آزمایش‌های کاربردی اهمیت بسیار زیادی دارد.

امروزه روش‌های نوینی برای اجرای طراحی آزمایش‌ها به وجود آمده است. این روش‌ها با تولید مدل‌های پیش‌بینی مناسب در مقایسه با جمع‌آوری اطلاعات ارتقاء یافته‌اند و به نام روش‌های مدرن طراحی آزمایش‌ها معروف هستند.

روش‌هایی مانند غربال‌سازی فاکتورها و طراحی مختلط و طرح‌های سطح پاسخ شامل متغیرهای کمی و کیفی از جمله روش‌های نوین بوده که با ترکیب روش‌های

در گسترش و توسعه طراحی آزمایش‌ها افرادی همچون Box and Bisgaard و Box و همکاران طرح‌های مناسب آزمایشگاهی و صنعتی را گسترش. کتاب وی به نام آمار برای آزمایش‌ها³، در زمینه صنعت تولیدهای شیمیایی و دیگر صنایع با تولید پیوسته نوشته شده است.

اشخاص دیگری نیز همچون:

Johnson (1987)، Hicks و همکاران (1982)،
Hendrix (1979)، Daniel (1976)،
Montgomery (1991)، Lorenzen & Anderson (1993) و
Dowlatshahi (2003)

در این زمینه به فعالیت پرداختند. مقاله‌هایی نیز در زمینه اهمیت طراحی آزمایش‌ها نوشته شده است و طراحی آزمایش‌ها را به عنوان یک ابزار مؤثر در افزایش رقابت‌پذیری برای محصول‌ها و فرایندها در سازمان‌ها معرفی می‌کنند [3 و 4].

روش جستجوی متغیرها که توسط دورین شاینین⁴ که یک مشاور مدیریت کیفیت مشهور در کشور آمریکا بود، توسعه داده شد. این روش، یکی از روش‌های طراحی آزمایش‌ها است که برای یافتن متغیرهای بحرانی و مهم در فرایندهای تولیدی بسیار کارآمد است [5]. Bhote در سال 1988 این روش را به عنوان یک روش مؤثر در کاهش تغییرات عنوان کرد. وی ادعا می‌کند که این روش بسیار بر روش طرح‌های عاملی برتری دارد و همچنین گفته شده است وقتی که تعداد متغیرهایی که برای ارزیابی انتخاب می‌شوند چهار یا بیشتر باشند، روش شاینین بسیار مفید است. دورین شاینین هفت ابزار مشهور طراحی آزمایش‌ها را برای بهبود کیفیت محصول و فرایند توسعه و ارتقاء داد:

- 1- نمودارهای چند متغیره
- 2- جستجوی مرکب
- 3- مقایسه‌های جفتی
- 4- جستجوی متغیرها
- 5- طرح‌های عاملی کامل
- 6- B vs C
- 7- نمودارهای پراکندگی [5]

روش شاینین، فاکتورهایی را که سهم قابل توجهی در ایجاد انحراف دارند، با عنوان سه فاکتور مهم شناسایی می‌کند [6]. شاینین با کاربرد طرح‌های کسری عاملی برای آزمایش که اساس کار روش تاگوچی است، مخالف

فراهم می‌شود؛ زیرا برای ترکیب این روش‌ها با الگوریتم‌های بهینه‌سازی نوین، شناخت روش‌ها و انتخاب الگوریتم مناسب ضروری است.

سه روش تاگوچی، سنتی و شاینین از روش‌های طراحی آزمایش‌ها هستند. روش‌های تاگوچی و سنتی از میان این روش‌ها معروفیت کافی دارند، اما روش شاینین چندان شناخته‌شده نیست. مقایسه این سه روش با انجام یک مطالعه موردی و شناخت نقاط قوت و ضعف آنها منجر به شناخت بیشتر روش‌ها می‌شود.

شناخت بیشتر روش‌ها از لحاظ توانایی و ضعف منجر به شانس بیشتر برای اجرای کاربردی در محیط‌های صنعتی و خدماتی است. این موضوع با استناد به این مطلب قابل پذیرش است که اغلب در محیط‌هایی که نیاز به انجام آزمایش‌هایی برای یافتن علل مشکل و یا افزایش کیفیت تولید و خدمات است، آزمایش‌ها همواره با در نظر گرفتن تغییر هر بار یک عامل انجام می‌گیرد و در مواقعی بعد از انجام چندین آزمایش و نرسیدن به جواب مطلوب، انجام آزمایش‌ها به صورت ناکامل و فقط با ایجاد هزینه و نگرش منفی به روش طراحی آزمایش‌ها رها می‌شود. در واقع با اجرای درست و به موقع روش طراحی آزمایش‌ها علاوه بر ایجاد بهبود، از ایجاد هزینه‌های اضافی در سازمان‌ها و شرکت‌های تولیدی (خصوصاً تولید انبوه) جلوگیری می‌شود.

پیشینه

روش کلاسیک و شاینین

طراحی آزمایش‌ها به روش سنتی یک رویکرد آماری است. این روش توسط فیشر¹ در سال 1920 در انگلستان مطرح شد. برای سال‌های متمادی وی مسئول تحلیل داده‌های آماری یک ایستگاه کشاورزی در لندن بود. فیشر تحلیل واریانس² (ANOVA) را در تلاش برای بهبود محصول‌های کشاورزی ابداع کرد و اولین کسی بود که این روش را در طراحی آزمایش‌ها به کار گرفت. بسیاری از کاربردهای اولیه روش طراحی آزمایش‌ها در علوم کشاورزی و زیست‌شناسی بوده‌اند و بسیاری از اصطلاح‌های آن از این علوم به ارث رسیده‌اند. اما به نظر می‌رسد که اولین کاربردهای صنعتی طراحی آزمایش‌ها در اوائل سال 1930 در صنعت پشم‌بافی انگلستان بوده است.

جانبداری می‌کند، متداول‌ترین طرح‌های آرایه‌های متعامد L_8 L_{16} L_{18} ، است [10].

این روش، روش‌های آماری را در فرایندهای مهندسی به کار می‌گیرد [11]. مراحل اجرای روش طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی با در نظر گرفتن جزئیات و به ترتیب اهمیت به این قرار است:

1- تشکیل تیم 2- مشخص کردن اهداف مورد مطالعه 3- فرموله‌سازی مسئله 4- شناسایی کاراکترهای عملکرد که با مسئله بیشترین ارتباط را دارد 5- شناسایی فاکتورهای مسئله:

5-1- فاکتورهای کنترل⁹: فاکتورهایی هستند که در شرایط طبیعی مسئله قابل کنترل هستند.

5-2- فاکتورهای اغتشاش¹⁰: فاکتورهایی که کنترل آنها در شرایط طبیعی بسیار سخت یا پرهزینه است.

5-3- فاکتورهای میانگین¹¹: فاکتورهایی که بر میانگین عملکرد فرایند تأثیر می‌گذارند.

6- انتخاب سطوح فاکتورها و اثرهای متقابل امکان‌پذیر و درجه آزادی مرتبط با هر فاکتور و اثرهای متقابل امکان‌پذیر

7- طراحی یک آرایه متعامد مناسب

8- آماده‌سازی و انجام آزمایش‌های مشخص شده در طرح.

9- تحلیل آماری و تفسیر نتایج آزمایش.

10- انجام آزمایش‌های تأییدی [10].

مقایسه روش‌ها

در مقاله‌ای که توسط آنتونی و توماس (2005) انجام شده است، به مقایسه دو روش شاینین و تاگوچی با انجام مطالعه موردی برای بهینه‌سازی طراحی اتصال‌های مرکب شش گوش¹² در زمینه هوا و فضا پرداخته شده است. در این مطالعه بعد از اجرای دو روش ارزیابی و تحلیل نتایج حاصله از انجام آزمایش‌ها، در ارزیابی اعلام شده است که:

1- اجرای روش شاینین برای طراحی منجر به طراحی محصولی می‌شود که از محصول طراحی شده توسط روش تاگوچی مستحکم‌تر است.

2- هر دو روش با تنظیم سطوح فاکتورها به نتایج خاص خود می‌رسند. هر دو روش به کمک ابزار آماری، فاکتورهای با اهمیت را شناسایی کرده و آنها را در سطوح خاص تنظیم می‌کنند.

بود و این به دلیل تداخل ایجاد شده میان اثرهای اصلی و اثرهای متقابل است [5]. شاینین طرفدار کاهش منابع تغییر به تعداد قابل مدیریت (اغلب بین 2 تا 4) است. بر این اساس، وی از آزمایش با طرح‌های عاملی کامل، جانبداری می‌کند [7]. در واقع هدف استفاده از آزمایش با طرح‌های عاملی کامل، شناسایی همه اثرهای اصلی و متقابل فاکتورهای در نظر گرفته شده برای آزمایش است. اهداف طراحی آزمایش‌ها به روش شاینین به این ترتیب است:

1- تفکیک متغیرهای مهم و بحرانی از متغیرهای غیر مهم با انجام کمترین تعداد آزمایش‌ها و در نتیجه کاهش و صرفه‌جویی در هزینه و زمان.

2- شناسایی سه فاکتور:

2-1- فاکتور خیلی مهم (فاکتور X قرمز⁵)

2-2- دومین فاکتور مهم (فاکتور X صورتی⁶)

2-3- سومین فاکتور مهم (فاکتور X صورتی کمرنگ⁷)

3- باز گذاشتن مقدار تلورانس برای متغیرهای غیر مهم.

4- تعیین مقدار بهینه سه فاکتور مهم شناسایی شده [8].

مراحل اجرای روش شاینین به این ترتیب است:

- بناسایی مجموع متغیرها و پارامترهای ورودی فرایند
- محاسبه حدود کنترل برای میانه
- محاسبه حدود کنترل برای میانه
- تفکیک متغیرهای مهم و بحرانی از متغیرهای غیر مهم
- انجام آزمایش تأییدی
- آنالیز عاملی [8].

روش تاگوچی

دکتر جنیچی تاگوچی⁸ به کمک تحقیق‌های خود در سال‌های 1950 و 1960 اصول طراحی اثرزدا را توسعه داد و اساس کار خود را با به کار بستن نظریه‌هایش در توسعه محصول‌های مختلف اعتبار بخشید [9]. روش تاگوچی انحراف‌های ممکن از مقدار هدف را همراه با تابع زیان مدل‌بندی می‌کند. دکتر تاگوچی از کاربرد طرح‌های آرایه‌های متعامد برای اختصاص فاکتورهای انتخاب‌شده،

معیارها و زیر معیارها برای مقایسه روش‌ها

چهار معیار برای مقایسه روش‌ها با هم در نظر گرفته شده‌اند:

3-1-1- معیار میزان بهبود ایجادشده با وزن 50 درصد

3-1-2- معیار تعداد آزمایش‌های انجام‌گرفته با وزن 25 درصد

3-1-3- انعطاف‌پذیری در اجرا با وزن 15 درصد

3-1-4- معیار پیچیدگی یا سهولت اجرا و تجزیه و تحلیل از لحاظ قابلیت تفهیم بیشتر به کارکنان با وزن 10 درصد.

نرمالیزه‌سازی

اعداد به دست آمده برای هر معیار در محدوده‌های متفاوت عددی قرار می‌گیرند. برای همسان‌سازی آن، مقادیر باید نرمالیزه می‌شوند؛ به گونه‌ای که دو مقدار به دست آمده یک معیار خاص برای سه روش را با هم جمع کرده تا مقدار کل در آن معیار خاص به دست بیاید. مقدار به دست آمده برای هر معیار در هر روش بر مقدار کل تقسیم شده و در عدد 100 ضرب می‌شود. در این صورت می‌توان وزن هر معیار را در عدد به دست آمده (که برای همه روش‌ها در هر معیار در محدوده 0 و 100 قرار دارد، ضرب کرده و امتیاز هر معیار را برای هر روش محاسبه می‌شود.

میزان بهبود ایجادشده

هر یک از روش‌ها، بهبودهایی به نسبت مقدار اولیه در متغیر پاسخ ایجاد می‌کنند و ایجاد بهبود در متغیر پاسخ، هدف اصلی در اجرای طراحی آزمایش‌ها است. بنابراین این معیار به عنوان با اهمیت‌ترین معیار بیشترین وزن یعنی 50 درصد را به خود اختصاص می‌دهد. از رابطه زیر می‌توان این معیار را برای هر روش به دست آورد:

مقدار معیار میزان بهبود برای هر روش:

(1)

$100 \times$ (مقدار متغیر پاسخ بعد از بهبود / مقدار میانگین متغیر پاسخ قبل از بهبود)

هر چه مقدار به دست آمده از رابطه بالا برای یک روش بیشتر باشد، توانایی آن روش در ایجاد بهبود بیشتر بوده و نسبت به روش دیگر ارجح‌تر و امتیاز بیشتری دارد.

3- روش شاینین با زمان کمتر و منابع کمتر به طور قابل توجهی از روش تاگوچی ساده‌تر بوده و امکان اجرای آن به راحتی میسر است. اما روش شاینین به آزمایش‌های تأییدی بیشتری نیازمند است.

4- استفاده از روش تاگوچی، تیم، امکان اندازه‌گیری و ارزیابی تغییرها را دارد، در ضمن به کمک روش تاگوچی قابلیت شناسایی اثرهای تغییرها برای کاربران امکان‌پذیر می‌شود.

5- اعتبار نتایج به دست آمده از روش تاگوچی به دلیل محاسبه استحکامی که در عمل دسترسی به آن امکان‌پذیر نیست، مقداری زیر سؤال می‌رود [12]. در این مطالعه به کمک یک جدول مقایسه میان این دو روش با یک مطالعه موردی انجام شده است.

جدول 1: مقایسه دو روش سنتی و تاگوچی با انجام مطالعه موردی [12]

معیارها	روش تاگوچی	روش شاینین
اعتبار اثر های اصلی	ضعیف	قوی
اعتبار اثر های متقابل	قوی	ضعیف
پیچیدگی	زیاد	پایین
اجرا	سخت	آسان
هزینه آزمایش ها	پایین	بالا
انعطاف پذیری	پایین	بالا

روش انجام این پژوهش

در این پژوهش بعد از اجرای روش‌ها به کمک نتایج به دست آمده از هر روش و به کمک تعدادی معیار کمی و ذهنی که وزن‌های خاصی به آنها اختصاص یافته است، به مقایسه روش‌ها پرداخته می‌شود.

وزن معیارها که اهمیت معیارها را در مقایسه با هم می‌رساند با نظر و مشورت کارشناسان با توجه به ویژگی‌ها و منابع و شرایط شرکت روز نوش کرمانشاه در نظر گرفته شده است و از موردی و یا شرکتی، تا مورد و شرکت دیگر متفاوت است.

تعداد آزمایش‌های انجام گرفته

هر چه مقدار آزمایش‌های مورد نیاز در روش خاص طراحی آزمایش‌ها بیشتر باشد، میزان استفاده از دو منبع هزینه و زمان بیشتر است و برعکس. این معیار در درجه دوم اهمیت قرار گرفته، به گونه‌ای که وزن 25 درصد را به خود اختصاص می‌دهد. از رابطه زیر می‌توان این معیار را برای هر روش به دست آورد:

مقدار معیار تعداد آزمایش‌ها برای روش A:

(2)

(تعداد آزمایش‌های صورت گرفته برای روش A / 1)

با توجه به رابطه ذکر شده، مشخص است که صورت عبارت برابر عدد 1 است. هر چه تعداد آزمایش‌ها برای روش A بیشتر باشد، حاصل عبارت برای روش A عدد کوچک‌تری می‌شود و برعکس. بنابراین با تعداد بیشتر آزمایش مقدار کمتر عددی برای هر معیار حاصل شده و در نتیجه امتیاز کمتر را به همراه دارد.

انعطاف‌پذیری در اجرا

در بسیاری از مواردی که روش‌های طراحی آزمایش‌ها به کار گرفته می‌شوند، ممکن است در ابتدا از وارد کردن فاکتورهای اصلی در طراحی آزمایش‌ها کوتاهی شود و یا در مواردی به دلیل وارد شدن متغیر یا متغیرهای اساسی دیگر (که ناشی از تغییر در فرایندها، خرید مواد اولیه متفاوت از لحاظ ترکیب و نوع و کیفیت و... است)، ساختار طراحی آزمایش، یک و یا حتی چند فاکتور اساسی را نداشته باشند. در این مواقع اگر بتوان بدون نیاز به اجرای کامل طراحی آزمایش‌ها تشخیص داد که فاکتور مورد نظر با اهمیت است یا نه، و در صورتی که فاکتور مورد نظر با اهمیت باشد، می‌توان طرح را بار دیگر اجرا کرد؛ ولی اگر فاکتور یا فاکتورهای مورد نظر با اهمیت نباشند، می‌توان نتایج طرح قبلی را همچنان معتبر دانست و از اجرای دوباره روش خودداری کرده و در منابع شامل هزینه و زمان و... در حد قابل توجهی صرفه‌جویی کرد. امکان تخمین اثر متقابل با اهمیت میان فاکتورهای موجود نیز برای بعضی روش‌ها با محدودیت‌هایی همراه است که این محدودیت‌ها باعث کاهش انعطاف‌پذیری روش‌ها می‌شود. در نهایت برای بررسی میزان انعطاف‌پذیری، دو حالت تعریف می‌شود:

1- زمانی که برای یک روش امکان بررسی اهمیت یک یا چند فاکتور جدید با انجام چند آزمایش (نه اجرای کامل طرح) امکان‌پذیر باشد و در صورت بی‌اهمیت بودن، از اجرای دوباره طرح جلوگیری کرده و طرح قبلی را همچنان بتوان معتبر دانست.

2- اگر بتوان اثر متقابل با اهمیت میان فاکتورها را بدون انجام آزمایش‌های جدید و یا با انجام آزمایش کم (به گونه‌ای که بتوان از بخشی از آزمایش‌های قبل استفاده کرد و بدون نیاز به اجرای یک طرح جدید) تعیین کرد.

انعطاف‌پذیری زیاد: هر دو حالت امکان‌پذیر باشند.

انعطاف‌پذیری کم: فقط حالت دوم امکان‌پذیر باشد.

عدم انعطاف‌پذیری: هیچ یک از حالت‌ها امکان‌پذیر نباشند. اما در بررسی انعطاف‌پذیری دو روش طراحی آزمایش‌ها با هم، با توجه به میزان انعطافی که هر روش دارد، مقدار عددی خاصی اختصاص می‌گیرد که این مقدار بعد از نرمالیزه‌سازی و ضرب در وزن معیار به عنوان امتیاز برای هر روش در نظر گرفته می‌شود. در جدول (2) به معرفی درجه انعطاف‌پذیری و امتیاز اختصاصی به هر یک از آنها پرداخته می‌شود:

جدول 2: انعطاف‌پذیری

مقدار معیار برای هر روش	انعطاف‌پذیری روش
100	انعطاف‌پذیری زیاد
50	انعطاف‌پذیری کم
20	عدم انعطاف‌پذیری

اهمیت این معیار در رتبه سوم قرار دارد و به همین دلیل امتیاز 15 درصد را در مقایسه با دیگر معیارها به خود اختصاص می‌دهد.

پیچیدگی یا سهولت اجرا و تجزیه و تحلیل از لحاظ قابلیت تفهیم بیشتر به کارکنان

اگر روشی که برای حل مشکل‌های کیفی و یا ایجاد بهبود در یک واحد تولیدی یا خدماتی به کار گرفته می‌شود، برای افراد معمولی و کارکنانی که به طور گسترده‌ای با فرایندها و در نتیجه مشکل‌هایی که وجود دارد قابل درک باشد، آن روش از شانس بیشتری در اجرای مستمر و توانایی بسیار بیشتری در حل مشکل‌ها و ایجاد بهبود بهره‌مند است.

بنابراین معیار سومی که به منظور مقایسه روش‌ها در نظر گرفته شده است، پیچیدگی یا سهولت اجرا و قابلیت

نباشد، نمی‌توان به نتیجه دقیق و درستی دست یافت. بنابراین سادگی و رها بودن از فرمول‌های پیچیده که اساس آن به راحتی قابل درک نباشد، می‌تواند به عنوان یک مزیت برای یک روش مطرح شود.

مقایسه‌ها با توجه به مقیاس‌های کمی و ذهنی

در دو معیار میزان بهبود ایجاد شده و تعداد آزمایش‌های مورد نیاز یک روش، مقایسه‌ها با داشتن مقادیر کمی هر معیار که با ایجاد تغییرهایی به امتیاز تبدیل شده‌اند، صورت می‌گیرد. بنابراین با توجه به این دو معیار، این قسمت از مقایسه، مقایسه با مقیاس کمی است. اما برای دو معیار، میزان انعطاف‌پذیری و میزان پیچیدگی به دلیل ماهیت خاص آنها با تعریف حالت‌های کیفی و اختصاص امتیاز، انجام مقایسه‌ها امکان‌پذیر شده است. این نوع مقایسه، مقایسه با مقیاس ذهنی نامیده می‌شود.¹⁴ قابل ذکر است که برای معیار پیچیدگی امتیازدهی روش‌ها با توجه به نظرسنجی گروهی از تیم اجرایی طراحی آزمایش‌ها به صورت دلفی، انجام گرفته است.

مقایسه طراحی آزمایش‌ها به روش‌های تاگوچی و

سنٹی و شاینین با یکدیگر

در این قسمت، بعد از مقایسه سه روش طراحی آزمایش‌ها به صورت دو به دو، سه روش به صورت یکجا و با توجه به نتایج حاصله از مقایسه دو به دو با هم مقایسه می‌شوند. در ادامه با استفاده از معیارها و ترتیب وزنی آنها به مقایسه سه روش طراحی آزمایش‌ها پرداخته می‌شود.

میزان بهبود ایجاد شده

با توجه به جدول مقادیر بهینه که دو مقدار متغیر پاسخ بعد از تنظیم فاکتورها در سطح بهینه و مقدار متوسط آن برای کل آزمایش‌های انجام گرفته، مشخص است.

با توجه به اینکه مقدار متغیر پاسخ برای هر سه روش برابر MSD (میانگین مجذور انحراف از هدف) (برای روش تاگوچی S/N است که به MSD تبدیل شده است) است، مقایسه سه متغیر پاسخ همسان می‌شود. برای مقایسه سه روش سنٹی و تاگوچی و شاینین از جدول (4) استفاده می‌شود.

تفہیم بیشتر است. در این راستا با توجه به جدول مقدار معیار پیچیدگی برای هر روش با توجه به ویژگی‌های آن مشخص می‌شود که با نظرسنجی از تیم اجرایی طراحی آزمایش‌ها و اختصاص مقدار مناسب به هر زیرمعیار، نرمالیزه‌سازی شده و با ضرب در وزن معیار به عنوان امتیاز به هر روش اختصاص می‌یابد.

جدول 3: میزان پیچیدگی

میزان پیچیدگی روش زیر معیارهای بررسی سهولت و یا پیچیدگی اجرا و تحلیل	پیچیدگی بالا	پیچیدگی پایین
سهولت در یافتن فاکتورهای با اهمیت	0-50	51-100
نوع طرح آزمایش (ترکیب فاکتورها برای اجرای آزمایش‌ها)	0-50	51-100
نوع متغیر پاسخ نهایی برای تجزیه و تحلیل نتایج	0-50	51-100

همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای بررسی پیچیدگی یا سهولت اجرا از لحاظ قابلیت تفہیم بیشتر به کارکنان، زیرمعیارهایی معرفی شده است.

زیرمعیار سهولت در یافتن فاکتورهای اصلی

در بسیاری از موارد، کارشناسان و متخصصان بر اساس مفهومی که در زیر بنای نمودار پارتو¹³ وجود دارد، معتقدند که فقط تعداد کمی از فاکتورها در ایجاد مشکل‌ها و یا بهبود وجود دارند. روش یافتن فاکتورهای اساسی در صورت سادگی، به عنوان یکی از عوامل موثر در کاهش پیچیدگی یک روش در نظر گرفته شده است.

زیرمعیار نوع طرح آزمایش (ترکیب فاکتورها برای اجرای آزمایش‌ها)

به طور حتم هر چه طرح آزمایش ساده‌تر باشد، یعنی تغییر کمتری در سطوح فاکتورها وجود داشته باشد و نحوه ایجاد آن طرح از روند ساده‌ای بهره بگیرد، پیچیدگی کمتری دارد و به راحتی می‌توان آن را به افراد عادی در زمان کمتر تفہیم کرد.

زیرمعیار نوع متغیر پاسخ نهایی

در روش طراحی آزمایش‌ها، اگر متغیر پاسخ نهایی برای حتی بعضی افراد درگیر در اجرای روش قابل درک

جدول 4: امتیاز نهایی روش های سنتی و تاگوچی و شاینین با توجه به معیار میزان بهبود ایجاد شده

روش ها / مقادیر	روش شاینین	روش تاگوچی	روش سنتی
مقدار متوسط متغیر پاسخ (MSD)	4270,858	3931,878	4369,986
مقدار متغیر پاسخ در شرایط بهینه (MSD)	2615,331	2262,039	2032,341
مقدار بهبود	-1655,527	-1669,839	-2337,645
درصد بهبود = متغیر پاسخ بهینه / متوسط متغیر پاسخ	163,301	173,82	215,022
$100 \times$ درصد بهبود نرمالیزه شده	29,576	31,481	38,943
درصد بهبود نرمالیزه شده $\times 50\%$	14,788	15,740	19,742

در سطر چهارم، با نگاهی به ارقام که حاصل تفریق مقدار متوسط متغیر پاسخ از مقدار متغیر پاسخ در شرایط بهینه است، در می یابیم که در هر سه روش مقدار متغیر پاسخ در شرایط بهینه نسبت به متوسط مقدار متغیر پاسخ، کاهش قابل توجهی داشته است. در سطر آخر، امتیاز کل از ضرب درصد بهبود نرمالیزه شده در وزن معیار که برابر 50 درصد است، محاسبه شده است. بالاترین امتیازها به ترتیب روش سنتی، تاگوچی، شاینین هستند.

جدول 5: بهترین روش و میزان پذیرش روش ها با توجه به معیار میزان بهبود ایجاد شده

نوع روش	روش شاینین	روش تاگوچی	روش سنتی
امتیاز	14,788	15,740	19,742
پذیرش از دید معیار میزان بهبود	×	✓	✓✓

بیان دلایلی در رابطه با تفاوت میزان بهبود ایجاد شده برای هر روش

با توجه به اینکه بهبود ایجاد شده برای روش سنتی بیشترین مقدار از میان سه روش است، بنابراین می توان گفت که این روش در تشخیص فاکتورهای با اهمیت که اثر و یا اثر متقابل آنها در متغیر پاسخ تأثیرگذارتر از بقیه فاکتورها هستند، قوی تر عمل کرده است. پس می توان اثر فاکتورها و یا اثر متقابل آن روش را به عنوان مبنا قرار داده و به راحتی نقاط ضعف دو روش دیگر را در مقایسه با

این روش مشخص کرد. فاکتورهایی که اثر و یا اثر متقابل آنها با اهمیت هستند و در روش سنتی با تنظیم آنها در سطوح بهینه بالاترین میزان بهبود ایجاد می شود، با توجه به سهم درصدی ایجاد میزان بهبود عبارتند از:

جدول 6: فاکتور با اهمیت در سطح بهینه روش سنتی

فاکتور با اهمیت در روش سنتی	C_1	D_1E_1	A_1	B_1
میزان سهم اثرها در ایجاد بهبود	-808,155	-563,363	-517,609	-488,518
درصد سهم در ایجاد بهبود	34,57	24,1	22,142	19,187

در روش تاگوچی فقط در ابتدا دو اثر متقابل AC و AB از دید کارشناسان، مهم به نظر می رسید. فاکتورهایی که اثر آنها با اهمیت هستند و در روش تاگوچی به عنوان فاکتورهایی که با تنظیم آنها در سطوح بهینه بالاترین میزان بهبود حاصل شده است، با توجه به سهم درصدی در ایجاد میزان بهبود، عبارتند از:

جدول 7: فاکتور با اهمیت در سطح بهینه روش تاگوچی

فاکتور با اهمیت در سطح بهینه در روش تاگوچی	C_1	B_1	E_2	A_1
میزان سهم اثرها در ایجاد بهبود	.832	.613	.552	.404
درصد سهم در ایجاد بهبود	34,65,22	25,53	22,99	16,82

روش تاگوچی در تعیین فاکتورهایی که اثر اصلی آنها با اهمیت هستند، با تعیین سطوح بهینه برای آنها قدرتمند عمل کرده است. فاکتورهای A و B و C برای هر دو روش که در سطح پایین، خود به عنوان سطح بهینه انتخاب شده اند، به نام فاکتورهای اصلی و تأثیرگذار مشخص شده اند. اما چون اثر متقابل DE برای روش تاگوچی در ابتدا به عنوان یک اثر با اهمیت در نظر گرفته نشده است، این روش نتوانسته این اثر متقابل را به عنوان اثر متقابل با اهمیت شناسایی کند و با توجه به طرح خود، فاکتور E را به عنوان فاکتور با اهمیت تشخیص داده است و سطح بهینه را، با توجه به سطحی که میانگین متغیر پاسخ بهتر، انتخاب کرده است یعنی E 2.

اما روش سنتی چون اثر متقابل به درستی با اهمیت تشخیص داده است، سطح E 1 را که در آن سطح اثر متقابل آن با سطح D 1 منجر به بهترین مقدار متغیر

شاینین به ترتیب بیشترین امتیاز (نیاز به کمترین تعداد آزمایش ها) را دارند.

جدول 9: امتیاز نهایی روش های سنتی و تاگوچی و شاینین با توجه به معیار تعداد آزمایش ها

روش ها / نتایج	روش شاینین	روش تاگوچی	روش سنتی
تعداد آزمایش ها	72	28	52
مقدار معیار تعداد آزمایش ها برای هر روش = (تعداد آزمایش روش / 1)	0,014	0,036	0,019
نرمالیزه سازی مقدار معیار تعداد آزمایش ها برای هر روش	20,290	52,174	27,536
امتیاز کل روش = مقدار معیار نرمالیزه شده $\times 0,25$	5,072	13,043	6,884

جدول 10: بهترین روش و میزان پذیرش روش ها با توجه به معیار تعداد آزمایش ها

روش / امتیاز	روش شاینین	روش تاگوچی	روش سنتی
امتیاز بدست آمده برای هر روش	5,072	13,043	6,884
پذیرش از دید معیار تعداد آزمایش	X	✓✓	✓

انعطاف پذیری در اجرا

بنابراین با توجه به ویژگی های هر روش و تعاریف ارائه شده در مورد انعطاف پذیری، مشخص می شود که هر روش به چه میزان انعطاف پذیر بوده و امتیاز مربوط به هر روش تعیین می شود.

روش سنتی: تنها حالت دوم انعطاف پذیری را میان دو حالت مشخص شده برای بررسی انعطاف پذیری شامل می شود، پس انعطاف پذیری کم دارد.

روش تاگوچی: چون این روش هیچ یک از دو حالت مشخص شده برای بررسی انعطاف پذیری را شامل نمی شود، پس انعطاف پذیر نیست.

روش شاینین: این روش هر دو حالت مشخص شده برای بررسی انعطاف پذیری را شامل می شود، بنابراین انعطاف پذیری زیاد دارد. بعد از نرمالیزه سازی مقدار معیار برای روش ها، مقدار امتیاز کل با در نظر گرفتن اهمیت معیار انعطاف پذیری که برابر 15 درصد است، برابری است:

پاسخ می شود، به عنوان سطح بهینه شناسایی کرده است. بنابراین می توان گفت که روش تاگوچی در تخمین اثرهای متقابل ضعیف عمل کرده است. روش شاینین در تشخیص فاکتورهای که اثر اصلی آنها بسیار با اهمیت هستند، قدرتمند عمل کرده است. فاکتورها و اثرهای متقابل با اهمیت برای این روش عبارتند از:

جدول 8: فاکتور با اهمیت در سطح بهینه روش شاینین

فاکتور با اهمیت در سطح بهینه در روش سنتی	C ₁	A ₁	ACE	CE
میزان سهم اثرها در ایجاد بهبود	-838,904	-481,282	-182,849	-152,849
درصد سهم در ایجاد بهبود	50,673	29,071	11,045	9,211

روش شاینین دو فاکتور C و A را در سطح پایین آنها به عنوان فاکتورهای اصلی با اهمیت شناسایی کرده است و دقیقاً مانند روش سنتی، تأثیرگذارترین فاکتور را فاکتور C و بعد از آن فاکتور A بیان کرده است. اما طبق روش سنتی (که به عنوان بهترین روش شناخته شده است)، اثر متقابل DE سومین اثر با اهمیت است و فاکتور D به عنوان یک فاکتور که اثر اصلی آن با اهمیت است شناخته نشده است. پس روش شاینین نتوانسته است این اثر متقابل با اهمیت را شناسایی کند و چون اثر متقابل ACE به عنوان سومین اثر با اهمیت شناخته شده است، سطح پایین برای فاکتور E به عنوان سطح بهینه شناسایی شده است. بنابراین روش شاینین در تخمین اثرهای اصلی و متقابل ضعیف عمل کرده و فقط اثرهای اصلی را تشخیص داده است.

تعداد آزمایش های انجام شده

با توجه به این معیار، می توان به مقایسه روش ها از نظر میزان منابع پرداخت. در مراحل قبل، تعداد آزمایش ها برای هر روش تعیین شده است، بنابراین در ادامه امتیاز هر سه روش مشخص می شود. در جدول (9) مقایسه و امتیازدهی انجام شده است:

تعداد 72 آزمایش برای روش شاینین انجام شده است، بنابراین مقدار معیار تعداد آزمایش و در نتیجه امتیاز در مقایسه با روش های تاگوچی و سنتی، کمتر است. بعد از روش تاگوچی، روش سنتی و در انتها روش

روش شاینین

روش شاینین برای تشخیص اثرهای با اهمیت از روند سهل‌تری استفاده می‌کند، بنابراین می‌توان گفت که از لحاظ یافتن اثرهای با اهمیت، پیچیدگی کمتری دارد.

نوع طرح آزمایش (ترکیب فاکتورها برای اجرای آزمایش‌ها)

روش‌های سنتی و شاینین: طرح آزمایش روش سنتی که به طرح‌های عاملی معروف هستند، طرح آزمایش برای روش شاینین از روند ساده‌ای بهره می‌گیرد. بنابراین می‌توان گفت که روش شاینین و روش سنتی از نظر طرح آزمایش پیچیدگی کمی دارد.

روش تاگوچی: طرح آزمایش برای روش تاگوچی از آرایه متعامد تشکیل شده است و این روش از نظر طرح پیچیدگی بیشتری به نسبت دو روش سنتی و شاینین دارد.

نوع متغیر پاسخ

روش‌های سنتی و شاینین: متغیر پاسخ که در روش شاینین و سنتی مورد تجزیه و تحلیل و استفاده قرار می‌گیرد، یکسان است و اغلب برای هر نوع آزمایشی می‌توان از فرمول‌های ساده و قابل درکی که افراد کم و بیش با آن سر و کار دارند، استفاده کرد. بنابراین می‌توان گفت که دو روش شاینین و سنتی از نظر متغیر پاسخ برای انجام محاسبه‌های آماری پیچیدگی کمی دارند.

روش تاگوچی

چون متغیر پاسخ نهایی در روش تاگوچی نسبت S/N است، این متغیر پاسخ، پیچیدگی نسبتاً بالایی از نظر فرمولی و منطقی زیر بنایی آن دارد. پس می‌توان گفت که روش تاگوچی پیچیدگی بیشتری از نظر متغیر پاسخ به نسبت دو روش سنتی و شاینین دارد. حال با جمع مقادیر زیر معیارها و به دست آوردن یک مقدار نهایی و نرمالیزه‌سازی و ضرب در وزن اختصاص داده شده به معیار پیچیدگی امتیازدهی هر روش صورت می‌گیرد.

جدول 11: امتیاز نهایی روش‌های سنتی و تاگوچی و شاینین با توجه به معیار میزان انعطاف‌پذیری

روش سنتی	روش تاگوچی	روش شاینین	روش امتیاز
انعطاف پذیری کم	عدم انعطاف پذیری	انعطاف پذیری زیاد	نوع انعطاف پذیری
50	20	1000	مقدار معیار انعطاف پذیری
29,412	11,765	58,824	نرمالیزه سازی مقدار معیار انعطاف پذیری
4,412	1,465	8,824	امتیاز کل = امتیاز × 15%

در جدول (12) بهترین روش از دید این معیار مشخص شده است. بعد از روش شاینین، روش سنتی و در انتها روش تاگوچی منعطف‌ترین روش‌ها قرار گرفته است.

جدول 12: بهترین روش و میزان پذیرش روش‌ها با توجه به معیار میزان انعطاف‌پذیری

روش سنتی	روش تاگوچی	روش شاینین	نوع روش امتیاز
4,412	1,765	8,824	امتیاز بدست آمده برای هر روش
✓	×	✓✓	پذیرش از دید معیار انعطاف پذیری

پیچیدگی یا سهولت اجرا و تجزیه و تحلیل از لحاظ قابلیت تفهیم بیشتر به کارکنان:

با توجه به جدول (3-2) که سه زیرمعیار را برای محاسبه معیار اصلی که بررسی پیچیدگی و یا سهولت اجرا است، در نظر می‌گیرد و با نظرسنجی از تیم اجرایی طراحی آزمایش‌ها برای امتیازدهی، به راحتی می‌توان به مقایسه سه روش پرداخت.

سهولت در یافتن اثرهای با اهمیت روش‌های سنتی و تاگوچی

دو روش سنتی و تاگوچی برای یافتن اثرهای با اهمیت، با انجام همه آزمایش‌ها و در نهایت محاسبه میانگین متغیر پاسخ برای سطوح مختلف فاکتورها یا دو فاکتوری که اثر متقابل آنها مورد نظر است و کم کردن آنها از هم، به محاسبه اثرها می‌پردازند و پیچیدگی نسبتاً بالایی دارند.

محاسبه امتیاز کل و یافتن روش بهتر

بعد از مقایسه روش‌ها با توجه به معیارهای معرفی‌شده و مشخص کردن امتیاز هر روش با جمع همه امتیازها با توجه به معیارها، مقدار امتیاز نهایی برای هر روش به دست می‌آید.

با توجه به جدول فوق و مجموع امتیازها برای روش‌ها، چون امتیاز به دست آمده برای روش سنتی بیشتر از دو روش تاگوچی و شاینین است، برای مورد خاص کاهش انحراف از مقدار هدف اسیدیته و pH نوشابه فانا، روش سنتی با توجه به معیارهای ارائه‌شده بهترین روش است. بعد از روش سنتی، تاگوچی و در نهایت شاینین به ترتیب برای اجرا در کاهش انحراف از هدف، اسیدیته و pH نوشابه فانا اولویت دارند.

بحث و نتیجه‌گیری

قبل از بیان نتایج این مطالعه در تأیید یا رد نتایج مطالعه‌های دیگر، باید اذعان کرد که مقایسه روش‌ها در این مطالعه برای یک شرکت خاص که به تولید محصولی خاص فعالیت دارد، انجام شده است و معیارها و شیوه مقایسه در این مطالعه با معیارها و روش مقایسه در مطالعه‌های انجام‌شده دیگر متفاوت است. بنابراین فقط نتایج انتهایی مطالعه حاضر با دیگر مطالعه‌ها قابل مقایسه است.

در تحقیقی که به مقایسه میان دو روش سنتی و تاگوچی طراحی آزمایش‌ها توسط مونتگمری در سال 1991 انجام شده است، بیشتر به ناکارآمدی روش تاگوچی در مقایسه با روش سنتی با توجه ویژگی‌های اجرایی دو روش و نیاز به ایجاد تغییر در روش تاگوچی اشاره شده است. چون در این مطالعه نیز امتیاز روش سنتی بیشتر از روش تاگوچی بوده است، می‌توان در کل به ناکارآمدی روش تاگوچی به نسبت روش سنتی اشاره کرد. در مقابل مدهاو وفاد که در سال 1995 به نقاط قوت روش تاگوچی در مقایسه با روش سنتی می‌پردازد، از توانایی بالای روش تاگوچی با ذکر دلایل و اشاره به ویژگی‌های اجرایی این روش در مقایسه با روش سنتی طرفداری می‌کند. اما توانایی بالای روش تاگوچی در مقایسه با روش سنتی در این مطالعه تأیید نشده است.

جدول 13: امتیاز نهایی روش‌های سنتی و تاگوچی و شاینین با توجه به معیار میزان پیچیدگی

نوع روش معیارها بررسی سهولت و پیچیدگی اجرا و تحلیل	روش شاینین	روش تاگوچی	روش سنتی
سهولت در یافتن فاکتورهای اصلی	60	40	40
نوع طرح آزمایش (ترکیب فاکتورها برای اجرای آزمایش‌ها)	60	40	60
نوع متغیر پاسخ نهایی برای تجزیه و تحلیل نتایج	60	40	60
مقدار معیار پیچیدگی	180	120	160
نرمالیزه سازی مقدار معیار پیچیدگی	39,103	26,087	34,783
امتیاز کل = مقدار معیار پیچیدگی نرمالیزه شده $\times 10\%$	3,913	2,609	3,478

در سطر آخر با ضرب مقدار امتیازها در 20 درصد، اهمیت معیار در مقایسه با بقیه معیارها، در نتیجه نهایی تأثیر داده شده است. با توجه به امتیاز، روش شاینین از سهولت بیشتری برخوردار است.

جدول 14: بهترین روش و میزان پذیرش روش‌ها با توجه به معیار میزان پیچیدگی

نوع روش امتیاز	روش شاینین	روش تاگوچی	روش سنتی
امتیاز بدست آمده برای هر روش	3,913	2,609	3,478
پذیرش از دید معیار بررسی پیچیدگی روش	✓✓	×	✓

جدول 15: امتیاز نهایی روش‌های سنتی و تاگوچی و شاینین با توجه به معیارها

نوع روش امتیاز معیار	روش شاینین	روش تاگوچی	روش سنتی
امتیاز بدست آمده با توجه به معیار میزان بهبود	14,788	15,740	19,742
امتیاز بدست آمده با توجه به معیار تعداد آزمایش	5,072	13,043	6,884
امتیاز بدست آمده با توجه به معیار میزان انعطاف پذیری	8,824	1,765	4,412
امتیاز بدست آمده با توجه به معیار میزان پیچیدگی	3,913	2,609	3,478
جمع کل امتیاز	32,597	33,175	34,516
روش بهتر با توجه به معیارها	✓	✓✓	✓✓✓

شاید به همین دلیل است که معروفیت این روش‌ها نیز به همین ترتیب است؛ به گونه‌ای که کمتر کسی است که در اجرای طراحی آزمایش‌ها دستی داشته و با روش سنتی آشنایی نداشته باشد و می‌توان گفت که روش شاینین بر عکس روش سنتی است. به گونه‌ای که حتی بسیاری از افراد آشنا و متخصص روش‌های طراحی آزمایش‌ها از این روش و نحوه اجرای آن مطلع نیستند. روش تاگوچی در بین این دو محدوده قرار گرفته است.

4) در کل می‌توان با توجه به اختلاف‌های امتیازی بالا میان روش‌ها، بیان کرد: روش سنتی قابلیت قابل توجهی در ایجاد بهبود دارد. روش تاگوچی نیاز به آزمایش‌های کمی برای اجرا داشته و از نظر هزینه بسیار قدرتمند عمل می‌کند و روش شاینین نقاط قوتی در انعطاف‌پذیری زیاد و پیچیدگی کم دارد که برای بسیاری از پروژه‌ها و مطالعه‌هایی که نیاز به اجرای طراحی آزمایش‌ها دارند، این نقاط قوت اهمیت بسیار بالایی دارند.

پس دانستن نقاط قوت و ضعف روش‌ها ما را در انتخاب درست بهترین روش که کمترین هزینه و بالاترین دستاورد را با توجه به شرایط و منابع در دسترس داشته باشد، یاری می‌کند و به این ترتیب افراد با دیدی جامع و نه فقط با توجه به تسلط به یک روش و معروفیت آن، بلکه با توجه به توانایی و نقطه‌قوت روش‌ها به انتخاب و اجرای روش مناسب طراحی آزمایش‌ها در سازمان‌ها و شرکت‌ها می‌پردازند.

در مقایسه دو روش شاینین و تاگوچی توسط آنتونی و توماس در سال 2005 با ارائه تعدادی معیار، مقایسه‌ای منصفانه با توجه به مطالعه موردی در زمینه هوا و فضا ارائه داده شده است و نقاط قوت و ضعف روش‌ها با توجه به آن معیارها بررسی شده است و نتایج آن مطالعه در موارد پیچیدگی زیاد، اجرای سخت، هزینه آزمایش پایین و انعطاف‌پذیری کم روش تاگوچی در مقایسه با روش شاینین، توسط نتایج این مطالعه تأیید شده است.

بعد از آنکه با توجه به هر معیار، اولویت اجرا برای روش‌ها مشخص شد، طبق وزن و اهمیت هر معیار و به دست آوردن امتیاز کل که حاصل جمع همه امتیازهای به دست آمده از معیارهای مختلف برای یک روش است، در کل نتیجه می‌گیریم که برای مورد خاص کاهش انحراف از هدف برای اسیدیته و pH نوشابه فانا، روش‌ها طبق جدول (16) اولویت دارند:

جدول 16: اولویت اجرا از دید همه معیارها

اولویت اجرا با در نظر گرفتن تمام معیارها	روش‌ها
1	سنتی
2	تاگوچی
3	شاینین

بنابراین در کل می‌توان گفت در این مطالعه:

روش سنتی به عنوان بهترین روش، اولویت اول، روش تاگوچی از اولویت مرتبه دوم و روش شاینین کمترین اولویت را برای اجرا دارد.

مراجع

- 1-Chantarast, N. (2003). "Modern design of experiment methods for screening and experimentation with mixture and qualitative variables." Doctoral thesis .Ohio State University.
- 2- Montgomery ,D.C. (1991). *Design and Analysis of Experiments*, 3rd ed .,Wilay,New York,NY.
- 3- Cupello, J.M. (1991). " Training technologies in experimental design. " Research Technology Management, Vol. 42, No. 5, PP. 47-50.
- 4- Hendrix, C.D. (1979). "What every technologist should know about experimental design." Chemtech, No. 9, PP. 167-174.
- 5- Shainin, D. and Shainin, P., (1988). "Better than Taguchi Orthogonal tables. *Quality and Reliability Engineering International* , Vol. 4, PP. 143-149.
- 6- Goodman, J. and Wyld, D.C. (2001). "The hunt for the red X :a case study in the use of Shainin design of experiments in industrial honing operations, Management Research News, Vol. 24, No.7.8, PP. 1-17.
- 7- Logothetis, N. (1990). "A perspective on Shannon's approach to experimental design for quality improvement. "Quality and Reliability Engineering International, Vol. 6, PP. 195-202.

- 8- Antony, J. and Ho Yuen Cheng, A. (2003). "Training for Shannon's approach to experimental design using a catapult." *Journal of European Industrial Training*, Vol. 27/8, PP. 405-412.
- 9- Phadke, M. S. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice Hall.
- 10- Antony, J. and Antony, J.F. (2001). "Teaching the taguchi method to industrial engineers." University Press, Vol.50, No. 4, PP. 141-149.
- 11- Rowland, H., Antony, J. and Knowles, G.(2000). "An application of experiment design for process optimisation." *The TQM Magazine*, Vol. 12, No. 2, PP. 78-83.
- 12- Thomas, A.J. and Antony, A.J. (2005). "A comparative analysis of the taguchi and shainin techniques in an aerospace environment." *Journal of Productivity and Performance Management*, Vol. 54, No. 8, PP. 658-678.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- R.A.Fisher
- 2- Analysis of Variance
- 3- Statistics for Experiment
- 4- Dorian Shainin
- 5- Red X
- 6- Pink X
- 7- Pale Pink X
- 8- Genichi Taguchi
- 9- Control Factor
- 10- Noise Factor
- 11- Signal Factor
- 12- Honeycomb Composite Joints
- 13- Pareto
- 14- Conceptual Comparison