# طراحي آزمايش‌هاي آماري براي كاليبراسيون شبيه‌ساز پرواز با شش درجه آزادي

**علي باباپور آتشگاه[۱]،عباس سيفي[*۲] و مرتضي بهبهاني‌نژاد[۳]**

[۱] دانش‌آموخته دانشكده مهندسي صنايع- دانشگاه صنعتي اميركبير

[۲] دانشيار دانشكده مهندسي صنايع- دانشگاه صنعتي اميركبير

[۳] استاديار دانشكده مهندسي مكانيک- دانشگاه شهيد چمران اهواز

(تاريخ دريافت ۸۵/۳/۱۳ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۸/۱۰/۱۵ ، تاريخ تصويب ۸۹/۱/۱۷)

## چكيده

كاليبراسيون شبيه‌ساز پرواز موضوعی اجتناب ناپذير و پيچيده است. هدف مقاله حاضر پاسخ‌گويي به سؤال‌های زير است:

۱- آيا طرح آزمايش در كيفيت كاليبراسيون تأثير دارد؟ چه طرحي براي كاليبراسيون مناسب است؟

۲- با چه روشي مي‌توان تعداد نقاط آزمايش را تعيين كرد؟

۳- چگونه مي‌توان از طراحي و تحليل آزمايش‌هاي آماري برای كاليبراسيون استفاده كرد؟

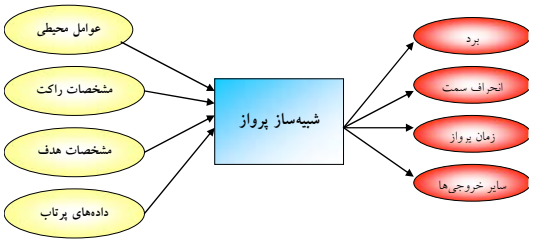
در اين تحقيق با استفاده از يک شبيه‌ساز پرواز در دسترس نشان داده شده است كه كيفيت كاليبراسيون می‌تواند وابسته به طرح آزمايش باشد و طرح آزمايش مناسب براي كاليبراسيون، طرحي است كه نقاط آن بر اساس منطقي مشخص در دامنه تغييرات عوامل توزيع شده باشد. همچنين با استفاده از مفهوم انتروپي، روشي براي انتخاب تعداد نقاط آزمايش پيشنهاد شده است. سپس مسئله كاليبراسيون با استفاده از طراحي و تحليل آزمايش‌هاي آماري مدل‌سازي و حل شده است. از جمله مزاياي روش پيشنهادي علاوه بر نظام‌مند كردن فرآيند كاليبراسيون، امكان كاليبراسيون بر اساس معيارهاي يک مولفه‌اي از قبيل خطاي برد، خطاي انحراف سمت و معيارهاي تركيبی است.

**واژه‌هاي كليدي:** كاليبراسيون شبيه‌ساز پرواز ، آزمايش‌هاي كامپيوتري، طراحي و تحليل آزمايش‌هاي آماري

## مقدمه

به طوركلي شبيه‌سازهاي كامپيوتري را مي‌توان به دو دسته، قطعي[۱] و تصادفي تقسيم كرد. به شبيه‌سازي‌ای قطعي گفته مي‌شود كه در هر تكرار براي ورودي‌هاي يكسان، خروجي‌هاي يكساني را توليد كند و در صورتي كه ورودي آن تغيير نكند، خروجي آن نيز تغيير نكند. شبيه‌سازهاي تصادفي به دليل وجود عوامل تصادفي با ورودي‌هاي يكسان در تكرارهاي مختلف خروجي‌هاي متفاوتي توليد مي‌كنند. نتايج ارايه شده در تحقيق حاضر مبتني بر يک شبيه‌ساز پرواز قطعي با شش درجه آزادي است كه در طراحي و تحليل سيستم‌هاي راكتي به كار برده مي‌شود و با دريافت ورودي‌هاي متعدد پاسخ‌هايي از قبيل برد، انحراف سمت، ارتفاع پرواز ، زمان پرواز را توليد مي‌كند. مدل مفهومي شبيه‌ساز پرواز در شكل (۱) نشان داده شده است.

عوامل شبيه‌ساز را مي‌توان به سه دسته عوامل طراحي، عوامل محيطي و عوامل مدل تقسيم كرد[۳]. در شبيه‌ساز مورد نظر از دو عامل $RCO$ و $TCO$ به عنوان عوامل مدل استفاده شده است. $RCO$ براي تصحيح ضرايب آيروديناميكي و $TCO$ براي تصحيح اثر راكت‌انداز در شبيه‌ساز به كار برده شده است.




**شكل۱: مدل مفهومي يک شبيه‌ساز پرواز شش درجه آزادي.**

منظور از كاليبراسيون، تخمين عوامل مدل($RCO$ و $TCO$) به نحوي است كه خروجي‌هاي شبيه‌ساز نسبت به معيارهاي تعريف‌شده كمترين خطا را در مقايسه با نتايج آزمايش‌هاي ميداني داشته باشند. كاليبراسيون با هدف

* نويسنده مسئول : تلفن :۶۶۴۵۴۰۰۱ , فاكس : ۶۴۱۳۹۶۹۶ ، Email: aseifi@aut.ac.ir

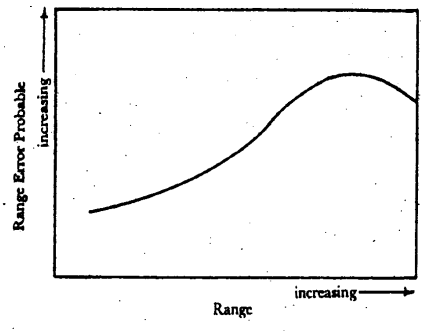
نزديكي هر چه بيشتر مراكز اصابت آزمايش‌هاي شبيه‌ساز به مراكز اصابت واقعی آزمايش‌هاي ميداني انجام مي‌شود. منظور از طرح آزمايش در كاليبراسيون، نحوه توزيع شليک‌ها در بازه برد راكت است. اين مقاله به دنبال پاسخ‌گويي به سؤال‌های زير است:

۱- آيا تأثير طرح آزمايش در كيفيت كاليبراسيون شبيه‌ساز معني‌دار است؟ در صورت معني‌دار بودن، چه طرحي براي كاليبراسيون شبيه‌ساز پرواز با شش درجه آزادي مناسب است؟

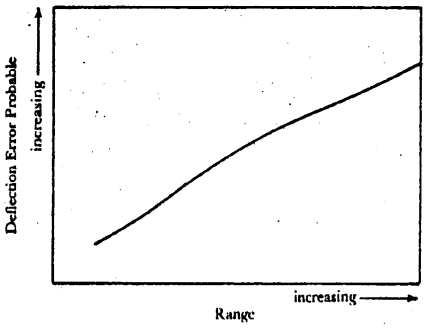
۲- با چه روشي مي‌توان تعداد مناسب نقاط آزمايش را تعيين كرد؟

۳- چگونه مي‌توان با استفاده از تجزيه و تحليل‌هاي آزمايش‌هاي آماري، كيفيت كاليبراسيون انجام شده را بررسي كرد؟

در شكل(۲) تغييرات خطاي برد نسبت به افزايش برد و در شكل(۳) تغييرات خطاي انحراف سمت نسبت به افزايش برد نشان داده شده است[۱٤]. با ملاحظه اين شكل‌ها مي‌توان گفت كه خطاي برد و خطاي انحراف سمت با افزايش برد افزايش مي‌يابند. تغييرات خطاي برد در انتهاي بازه برد غيرخطي است، ولي تغييرات خطاي انحراف سمت در كل بازه برد به طور تقريبی‌خطي است. با توجه به اطلاعات حاصل از شكل‌هاي (۲) و (۳) به نظر مي‌رسد هر چه طرح آزمايش توزيع شده باشد، بهتر مي‌تواند اثر خطاها را در كاليبراسيون اعمال كند. در بخش‌هاي بعدي چگونگي توليد طرح آزمايش توزيع‌شده و نحوه مقايسه طرح آزمايش پيشنهادي و طرح تجربي نشان داده شده است.




**شكل۲: تغييرات خطاي برد نسبت به برد .**




**شكل۳: تغييرات خطاي انحراف سمت نسبت به برد.**

## نحوه توليد طرح آزمايش توزيع شده

طرح آزمايش توزيع‌شده، يكي از طرح‌هاي نمونه‌گيري است كه از فضاي عوامل با توجه به توزيع احتمال تعيين‌شده نمونه‌گيري مي‌كند. با توجه به اينكه در بخش‌هاي بعدي، اثر طرح آزمايش مثلثي و يكنواخت با طرح تجربي مقايسه شده، لازم است امكان توليد طرح آزمايش مبتني بر توزيع يكنواخت و توزيع مثلثي فراهم شود. طرح آزمايش يكنواخت را مي‌توان با استفاده از الگوريتم فوق‌مكعبي‌لاتين[۲] (lhsdesign) موجود در نرم‌افزار MATLAB توليد كرد[۱۵]. براي توليد طرح آزمايش مثلثي در محيط MATLAB نيز برنامه (triadesign) نوشته شده است.

## مقايسه كارآيي طرح‌های آزمايش تجربي، يكنواخت و مثلثي

به عنوان اولين معيار مقايسه طرح‌هاي مختلف، مي‌توان از كيفيت كاليبراسيون استفاده كرد. يعني با هر طرح، يک شبيه‌ساز را كاليبره كرده و با مقايسه خروجي شبيه‌سازها با نتايج ميداني بهترين شبيه‌ساز كاليبره شده و در نتيجه بهترين طرح آزمايش را انتخاب كرد. سه طرح آزمايش كاليبراسيوني شامل طرح تجربي، طرح يكنواخت و طرح مثلثي مطابق جدول (۱) در دست است. با انتخاب مقداري براي $TCO$ ،$RCO$ شبيه‌ساز به نحوي تنظيم مي‌شود كه برد حاصل از آزمايش‌هاي آن به برد آزمايش‌هاي ميداني نزديک شود.

**جدول۱: طرح آزمايش تجربي، يكنواخت و مثلثي.**

| شماره آزمايش | طرح تجربي (زاويه شليک به درجه) | طرح يكنواخت (زاويه شليک به درجه) | طرح مثلثي (زاويه شليک به درجه) |
|---|---|---|---|
| 1 | 30 | 30.97 | 32.00 |
| 2 | 30 | 34.32 | 39.18 |
| 3 | 30 | 37.73 | 44.82 |
| 4 | 40 | 41.02 | 46.56 |
| 5 | 40 | 43.73 | 48.07 |
| 6 | 40 | 47.93 | 52.00 |
| 7 | 57 | 50.90 | 52.63 |
| 8 | 57 | 51.55 | 55.20 |
| 9 | 57 | 56.98 | 56.66 |

با استفاده از يک شبيه‌ساز مبنا، آزمايش‌هاي تعريف شده هر طرح در شرايط يكسان انجام گرفت و برد و انحراف سمت آزمايش‌ها در جداول (۲) ، (۳) و (۴) به ترتيب براي طرح تجربي، يكنواخت و مثلثي ارايه ثبت شد. در اين جداول علامت منفي در ستون انحراف سمت نشان‌دهنده اصابت راكت در سمت راست هدف و علامت مثبت به منزله اصابت راكت به سمت چپ هدف است.

**جدول۲: برد و انحراف سمت آزمايش‌هاي طرح تجربي.**

| شماره آزمايش | زاويه شليک به درجه | برد به متر | انحراف سمت به متر |
|---|---|---|---|
| 1 | 30 | 41538 | -496 |
| 2 | 30 | 41052 | 598 |
| 3 | 30 | 41176 | -214 |
| 4 | 40 | 54753 | -855 |
| 5 | 40 | 53740 | 3876 |
| 6 | 40 | 56014 | -622 |
| 7 | 57 | 73569 | -1865 |
| 8 | 57 | 72566 | 852 |
| 9 | 57 | 71871 | -1078 |

با توجه به رويكرد روش تجربي كه در آن محاسبه مقادير عوامل كاليبراسيون بر اساس برد انجام مي‌گيرد، همان رويكرد براي ساير طرح‌ها نيز به كار برده شده است. با استفاده از اطلاعات جدول(۲) ميانگين برد در سه زاويه پرتاب به دست آمده است و با تثبيت $TCO = 1.2$ مقدار $RCO$ با سعي و خطا به گونه‌اي تنظيم شد كه خروجي شبيه‌ساز بر ميانگين برد هر زاويه پرتاب منطبق شود، بنابراين براي زاويه پرتاب ۳۰ درجه $(RCO_{30} = 1.188)$ براي ۴۰ درجه $(RCO_{40} = 1.28)$ و براي ۵۷ درجه $(RCO_{57} = 1.189)$ به دست آمد و در نهايت مقدار عوامل بر اساس طرح تجربي مطابق $TCO = 1.2$ و $RCO = 1.219$ به دست آمد.

**جدول۳: برد و انحراف سمت آزمايش‌هاي طرح يكنواخت.**

| شماره آزمايش | زاويه شليک به درجه | برد به متر | انحراف سمت به متر |
|---|---|---|---|
| 1 | 30.97 | 42484 | -754 |
| 2 | 34.32 | 46683 | 184 |
| 3 | 37.73 | 52007 | -114 |
| 4 | 41.02 | 57092 | 1589 |
| 5 | 43.73 | 58109 | -930 |
| 6 | 47.93 | 64313 | 628 |
| 7 | 50.90 | 66510 | 2360 |
| 8 | 51.55 | 67573 | -1882 |
| 9 | 56.98 | 70787 | 2455 |

**جدول۴: برد و انحراف سمت آزمايش‌هاي طرح مثلثي.**

| شماره تست | زاويه شليک به درجه | برد به متر | انحراف سمت به متر |
|---|---|---|---|
| 1 | 32.00 | 43281 | -588 |
| 2 | 39.18 | 54077 | -862 |
| 3 | 44.82 | 61255 | -588 |
| 4 | 46.56 | 66141 | 46 |
| 5 | 48.07 | 66735 | 893 |
| 6 | 52.00 | 68862 | -768 |
| 7 | 52.63 | 70250 | 1398 |
| 8 | 55.20 | 71257 | -3340 |
| 9 | 56.66 | 72578 | -915 |

با رويكردي مشابه با توجه به برد آزمايش‌هاي هر طرح و با در نظر گرفتن $TCO = 1.2$ مقدار $RCO$ براي هر آزمايش مطابق جدول (۵) به دست آمد و در نهايت مقدار نهايي عامل $RCO$ با ميانگين‌گيري محاسبه شده و در جدول (۶) درج شده است.

**جدول۵: تخمين عوامل كاليبراسيون براي طرح های يكنواخت و مثلثي.**

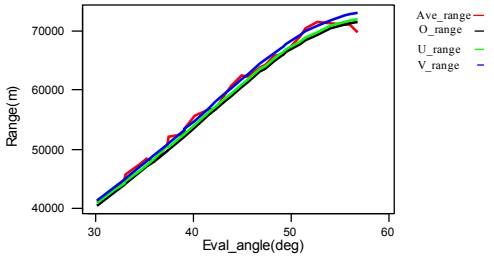
| شماره آزمايش | $RCO$ در طرح يكنواخت | $RCO$ در طرح مثلثي |
|---|---|---|
| 1 | 1.1829 | 1.2060 |
| 2 | 1.1875 | 1.1620 |
| 3 | 1.1615 | 1.1910 |
| 4 | 1.1540 | 1.1280 |
| 5 | 1.2360 | 1.1620 |
| 6 | 1.2189 | 1.2140 |
| 7 | 1.2475 | 1.1930 |
| 8 | 1.2367 | 1.1999 |
| 9 | 1.2365 | 1.1900 |

سپس سه شبيه‌ساز يكسان و كاليبره نشده با استفاده از نتايج جدول (۶) كاليبره شد. براي سهولت مقايسه، در ادامه شبيه‌سازهای كاليبره شده به ترتيب با O، U و V نام‌گذاری شده است. براي ارزيابي و مقايسه سه طرح آزمايش مورد بحث، ۳۰ آزمايش تصادفي تعريف و هر آزمايش سه بار تكرار شد.

اطلاعات حاصله در شكل (۴) ارايه شده است. در اين شكل محور افقي نشان‌دهنده زاويه ارتفاع و محور عمودي نشان‌دهنده برد نقطه اصابت است كه با استفاده از آن مي‌توان گفت برد شبيه‌ساز V به برد ميانگين نزديک‌تر است و شبيه‌ساز V بهتر كاليبره شده است.

**جدول۶: نتايج تخمين عوامل كاليبراسيون با سه طرح مختلف.**

| طرح آزمايش | *TCO* | *RCO* |
|---|---|---|
| تجربي | 1.2 | 1.2190 |
| يكنواخت | 1.2 | 1.2068 |
| مثلثي | 1.2 | 1.1829 |




**شكل۴: مقايسه برد ميانگين با برد شبيه‌ساز O ، U و V.**

نتايج به دست آمده از شكل (۴) با استفاده از آزمون فرض آماري T جفتي[۳] محک زده شد. براي برپايي آزمون T جفتي و مقايسه شبيه‌ساز V با شبيه‌ساز O دو خطاي $e_{VA}$ و $e_{OA}$ مطابق با روابط (۱) و (۲) تعريف شده است. $e_{VA}$ نشان‌دهنده تفاوت برد شبيه‌ساز V با ميانگين برد در سه تكرار هر آزمايش است و $e_{OA}$ نشان‌دهنده تفاوت برد شبيه‌ساز O با ميانگين برد در سه تكرار هر آزمايش است.

$$e_{VA} = R_V - R_A \quad (۱)$$

$$e_{OA} = R_O - R_A \quad (۲)$$

براي بررسي معني‌دار بودن تفاوت برد دو شبيه‌ساز نسبت به ميانگين برد، متغير $d_1$ طبق رابطه (۳) تعريف شده است.

$$d_1 = e_{VA} - e_{OA} \quad (۳)$$

اكنون مي‌توان بر اساس روابط (۱) الي (۳) آزمون فرض $H_0 : \mu_{d_1} = 0$ را نوشت و آن را در سطح اطمينان ۹۵درصد $(\alpha = 5\%)$ بررسي كرد. در آزمايش‌های آماری P-value معياري براي پذيرش يا رد فرض صفر است. در صورتي كه $P - value < \alpha$ باشد فرض صفر رد مي‌شود. با استناد به نتايج جدول (۷) فرض صفر رد شد و نتيجه گرفتيم كه شبيه‌ساز V به دليل داشتن مقدار خطاي كمتر نسبت به شبيه‌ساز O بهتر كاليبره شده است.

**جدول۷: نتايج آزمون T جفتي براي مقايسه شبيه‌ساز V با شبيه‌ساز O .**

| | N | ميانگين | انحراف معيار | انحراف معيار ميانگين |
|---|---|---|---|---|
| $e_{VA}$ | 30 | 350 | 905 | 165 |
| $e_{OA}$ | 30 | -870 | 842 | 154 |
| $d_1$ | 30 | 1219.8 | 232.3 | 42.4 |

P-value = 0.000

براي مقايسه شبيه‌ساز U با شبيه‌سازO علاوه بر دو خطاي $e_{VA}$ و$e_{OA}$ خطاي $e_{UA}$ مطابق رابطه (۴) و متغير $d_2$ مطابق رابطه (۵) تعريف شده است.

$$e_{UA} = R_U - R_A \quad (۴)$$

$$d_2 = e_{UA} - e_{OA} \quad (۵)$$

با استفاده از روابط تعريف شده براي مقايسه شبيه‌ساز U با شبيه‌ساز O فرض‌صفر $H_0 : \mu_{d_2} = 0$ تعريف شد.

با استناد به نتايج آزمون T جفتي ارايه شده در جدول (۸) فرض صفر رد مي‌شود. پس مي‌توان گفت شبيه‌ساز U به دليل داشتن مقدار خطاي كمتر نسبت به شبيه‌ساز O بهتر كاليبره شده است.

**جدول۸: نتايج آزمون T جفتي براي مقايسه شبيه‌ساز U با شبيه‌ساز O .**

| | N | ميانگين | انحراف معيار | انحراف معيار ميانگين |
|---|---|---|---|---|
| $e_{UA}$ | 30 | -445 | 860 | 157 |
| $e_{OA}$ | 30 | -870 | 842 | 154 |
| $d_2$ | 30 | 425.2 | 111.9 | 20.4 |

P-value = 0.000

براي مقايسه شبيه‌ساز V با شبيه‌ساز U متغير $d_3$ توسط رابطه (۶) تعريف و با استفاده از آن فرض صفر $H_0 : \mu_{d_3} = 0$ بررسی شد.

$$d_3 = e_{VA} - e_{UA} \quad (۶)$$

**جدول ۹: نتايج آزمون T جفتي براي مقايسه شبيه‌ساز V با شبيه‌ساز U .**

| | N | ميانگين | انحراف معيار | انحراف معيار ميانگين |
|---|---|---|---|---|
| $e_{VA}$ | 30 | 350 | 905 | 165 |
| $e_{UA}$ | 30 | -445 | 860 | 157 |
| $d_3$ | 30 | 794.6 | 191.2 | 34.9 |

P-value = 0.000

نتايج آزمون T جفتي براى اين آزمون فرض در جدول (۹) ارايه شده است. با ملاحظه P-value در جدول (۹) فرض صفر رد مي‌شود. بنابراين با توجه به رد فرض صفر مي‌توان گفت شبيه‌ساز V به دليل داشتن ميانگين خطاي كمتر نسبت به شبيه‌ساز U بهتر كاليبره شده است. بنابراين طرح آزمايش مثلثي در كاليبراسيون شبيه‌ساز پرواز با شش درجه آزادي مناسب‌تر است.

## مقايسه طرح آزمايش تجربي، يكنواخت و مثلثي با استفاده از معيار بهينگيD

طراحي بهينه يكي از شاخه‌هاي طراحي آزمايش‌ها است كه موضوع بحث آن بررسي الگوريتم‌هاي توليد طرح آزمايش توسط كامپيوتر است. در طراحي بهينه آزمايش‌ها به ماتريسي كه از تغييرات سطوح عوامل به دست مي‌آيد، ماتريس طراحي اطلاق می‌شود و آن را با $(\mathbf{X})$ نشان مي‌دهند. همچنين به عبارت $(\mathbf{X}^T\mathbf{X})$ ماتريس اطلاعات[۴] گفته مي‌شود. در صورتي كه طرح آزمايش با بهينه‌سازي دترمينان ماتريس اطلاعات به دست آيد، به آن طرح بهينه D اطلاق مي‌شود. از جمله كاربردهاي طراحي بهينه آزمايش‌ها، امكان مقايسه طرح‌هاي مختلف بر اساس آن است[۱۶]. ازآنجا كه طرح آزمايش براى كاليبراسيون تک عاملی است، ماتريس اطلاعات طرح به صورت ضرب داخلي دو بردار $(\mathbf{x}^T\mathbf{x})$ ظاهر مي‌شود كه حاصل آن يک اسكالر است. با علم به اين موضوع مي‌توان از اين مقدار براي مقايسه سه طرح تجربي، يكنواخت و مثلثي استفاده كرد. با استفاده از نرم‌افزار تهيه شده۱۰۰۰ طرح تصادفي يكنواخت و مثلثي ۶ نقطه‌اي، ۹ نقطه‌اي، ۱۲ نقطه‌اي و ۱۵ نقطه‌اي توليد و با استفاده از ماتريس اطلاعات، مقدار اطلاعات آنها اندازه‌گيري شد كه نتايج آن در جدول (۱۰) آمده است . با توجه به آن مي‌توان گفت ميانگين اطلاعات طرح مثلثي بيشتر از ميانگين اطلاعات طرح يكنواخت و تجربي و ميانگين اطلاعات طرح يكنواخت بيشتر از طرح تجربي است. بنابراين، بر اساس اين معيار نيز مي‌توان نتيجه‌گرفت كه طرح مثلثي نسبت به طرح‌هاي يكنواخت و تجربي، براى كاليبره كردن شبيه‌ساز بهتر است. همچنين طرح يكنواخت در مقايسه با طرح تجربي براي كاليبراسيون مناسب‌تر است.

**جدول۱۰: مقايسه ميانگين اطلاعات طرح تجربي، يكنواخت و مثلثي در ۱۰۰۰ تكرار.**

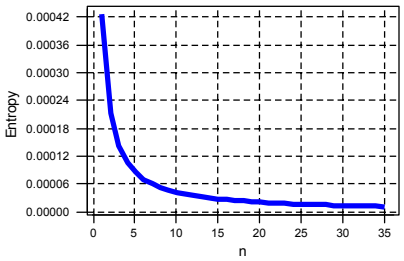
| طرح آزمايش | طرح ۶ نقطه‌اي | طرح ۹ نقطه‌اي | طرح ۱۲ نقطه‌اي | طرح ۱۵ نقطه‌اي |
|---|---|---|---|---|
| تجربي | 11498 | 17247 | 22996 | 28745 |
| يكنواخت | 11723 | 17563 | 23440 | 29293 |
| مثلثي | 14051 | 21103 | 28128 | 35159 |

با استفاده از نتايج بررسي‌هاي انجام گرفته مي‌توان گفت كه طرح آزمايش بر كيفيت كاليبراسيون تأثيرگذار است و طرح آزمايش مثلثي براي كاليبراسيون شبيه‌ساز با شش درجه آزادي بهتر است.

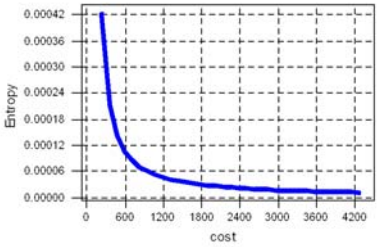
در ادامه فرض معلوم بودن تعداد آزمايش‌ها را آزاد كرده و رويكردي براي انتخاب تعداد آزمايش‌ها پيشنهاد مي‌شود. از آنجا كه شاخص انتروپي در قبل براي سنجش ميزان اطلاعات يک مجموعه تصادفي استفاده شده است[۱۷]، در اين قسمت با استفاده از آن، معياري براي تعداد آزمايش‌ها ارائه مي‌شود. آنتروپي يک بردار تصادفي $x$ با تابع چگالي توام $f$ به صورت $\mathrm{H}(x) = -E[\ln f(x)]$ تعريف مي‌شود كه در آن $E$ نشان‌دهنده اميد رياضي است[۱۸]. با استفاده از تعريف انتروپي براي طرح آزمايش نيز مي‌توان معياري مطابق با رابطه (۷) تعريف و به عنوان انتروپي طرح آزمايش معرفي كرد.

$$\mathrm{h}(x) = \frac{1}{E(\mathbf{x}^T\mathbf{x})} \qquad (۷)$$

در مطالعه انجام‌شده هر طرح آزمايش ۱۰۰۰ بار تكرار شده است و ميانگين اطلاعات ۱۰۰۰ تكرار به عنوان تخميني از اميد رياضي $E(\mathbf{x}^T\mathbf{x})$ منظور شده است. در شكل (۵) تغييرات معيار تعريف‌شده نسبت به تعداد نقاط آزمايش نشان داده شده است. با افزايش تعداد نقاط آزمايش از ۱۵ به بالا شيب تغييرات معيار خيلي كند شده است و چندان بر اطلاعات افزوده نمي‌شود.




**شکل۵: تغییرات انتروپي نسبت به تعداد نقاط آزمایش.**




**شکل۶: تغییرات انتروپي نسبت به هزینه آزمایش‌ها.**

حال با فرض پیروی هزینه آزمایش‌ها از مدل خطي $c = a + b(n)$ مي‌توان تغییرات انتروپي را نسبت به تغییرات هزینه آزمایش‌ها مورد مطالعه قرار داد. همان طوري که ملاحظه مي‌شود، هزینه آزمایش‌ها از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول مستقل از تعداد آزمایش‌ها بوده و قسمت دوم وابسته به تعداد آزمایش‌ها است. در شکل (۶) تغییرات انتروپي با هزینه ارایه شده است. براي رسم شکل (۶) فرض شده است که $a = 100$ واحد پولي و $b = 120$ واحد پولي باشد. شکل (۶) نشان مي‌دهد که با وجود افزایش هزینه از ۱۲۰۰ واحد پولي به بالا معیار انتروپي بهبود قابل‌توجهي نمی‌کند. بنابراین طراح آزمایش مي‌تواند بین هزینه آزمایش‌ها و تعداد آزمایش تصمیم‌گیري کند.

## کالیبراسیون شبیه‌ساز پرواز شش درجه آزادي با استفاده از DOE

در این قسمت کالیبراسیون شبیه‌ساز با استفاده از DOE مورد بررسي قرار گرفته و چارچوبي جدید براي آن پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه آزمایش‌هاي میداني برای کالیبراسیون با استفاده از مشخصات فني یکسان انجام مي‌گیرد، سه عامل زاویه ارتفاع، $RCO$ و $TCO$ مورد توجه قرار گرفته و بدون خدشه‌دار شدن جامعیت، روش سایر شرایط محیطي یکسان فرض شده است. بر اساس نظر کارشناسي، زاویه ارتفاع از ۳۰ درجه تا ۵۷ درجه، $0 < RCO \le 1.5$ و $-2 \le TCO \le 2$ تغییر مي‌کنند. با توجه به اینکه طرح مثلثي براي کالیبراسیون برتر تشخیص داده شد، بنابراین در این بخش، آزمایش‌ها با استفاده از طرح جدول (۱) انجام گرفته و در تحلیل اطلاعات برد و انحراف سمت از جدول (۴) استفاده شده است. در طرح آزمایش هر زاویه ارتفاع مترادف با یک شلیک میداني و هر شلیک میداني به عنوان یک بلوک در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه طرح مندرج در جدول (۱) شامل ۹ شلیک است، بنابراین در مدل، ۹ بلوک وجود دارد. عامل $RCO$ عاملي پیوسته است که در این بررسي براي آن پنج سطح منظور $RCO = 1.07 : 1.15 : 1.1829 : 1.2068 : 1.219$ شده است. هر سطح این عامل با $j$ نشان داده شده است. همچنین عامل $TCO$ عاملي پیوسته است و براي آن چهار سطح به صورت $TCO = 1.1 : 1.2 : 1.22 : 1.3$ در نظر گرفته شده است. هر سطح این عامل با $k$ نشان داده شده است. پس مي‌توان گفت در مسئله کالیبراسیون سه عامل زاویه ارتفاع، $RCO$ و $TCO$ وجود دارد. اثر زاویه ارتفاع به صورت اثر بلوکي در نظر گرفته شده است و دو عامل دیگر یکي پنج سطحي و دیگري چهار سطحي در نظر گرفته شده‌اند. طرح آزمایش این مسئله طرح عاملي بلوکي است و تعداد کل آزمایش‌ها برابر با $n = 5 \times 4 \times 9 = 180$ است. ازآنجا که کالیبراسیون شبیه‌ساز بر اساس برد و انحراف سمت انجام مي‌گیرد، بنابراین برد ($R$) و انحراف سمت ($AR$) آزمایش‌هاي میداني باید با انجام شلیک‌هاي میداني به دست آیند. در این بررسي به دلیل عدم امکان انجام شلیک‌هاي میداني، نتایج ارایه شده با استفاده از یک شبیه‌ساز مبنا استخراج شده است. برد ($S$) و انحراف سمت ($AS$) آزمایش‌هاي شبیه‌ساز با استفاده از مشخصات فني و شرایط محیطي یکسان و با استفاده از یک شبیه‌ساز کالیبره نشده تولید شده‌اند. بدین صورت که در هر اجرا مقدار زاویه ارتفاع، $RCO$ و $TCO$ تنظیم شده و برد و انحراف سمت اندازه‌گیری شده است. خطاي برد مطابق با رابطه (۸) تعریف شده است.

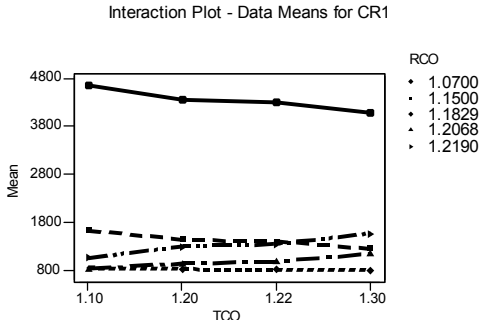
$$E_{R_{ijk}} = \left| R_i - S_{ijk} \right| \quad for \quad i = 1,..9; \; j = 1,..5; \; k = 1,..4. \qquad (۸)$$

در رابطه (۸)، $R_i$ برد آزمایش میدانی در زاویه ارتفاع $i$ام و $S_{ijk}$ برد شبیه‌ساز در زاویه ارتفاع $i$ و سطح $j$ ام عامل $RCO$ و سطح $k$ام عامل $TCO$ است. اگر معیار کالیبراسیون میانگین خطای برد انتخاب شود، می‌توان آن را مطابق با رابطه (۹) نشان داد که باید کمینه شود.

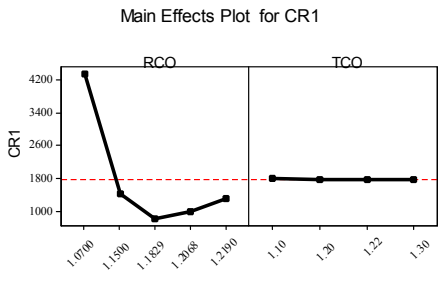
$$CR1_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{9} E_{R_{ijk}}}{9} \qquad \forall (j,k) \qquad (۹)$$

حال با تعریف معیار اول می‌توان با استفاده از نمودار اثر عاملی، نمودار اثر متقابل عوامل و تحلیل واریانس اقدام به انتخاب سطح بهینه عوامل کرد. در شکل (۷) نمودار اثر متقابل دو عامل نشان داده شده است. با توجه به آن می‌توان گفت دو عامل اثر متقابل ضعیفی دارند و می‌توان تأثیر آنها روی معیار اول را مستقل فرض کرد و مقدار بهینه عوامل را از نمودار اثر عاملی استخراج کرد. نمودار اثرعاملی در شکل (۸) ارایه شده است. معیار اول به ازای $RCO = 1.1829$ کمترین مقدار خود را دارد. از نمودار اثرعاملی به راحتی می‌توان فهمید که معیار اول نسبت به $RCO$ خیلی حساس است، ولی نسبت به تغییرات $TCO$ حساسیت چندانی نداشته و می‌توان مقدار این عامل را به دلخواه انتخاب کرد. در این تحقیق مقدار $TCO = 1.2$ قرار داده شده است.

محاسبات تحلیل واریانس در جدول (۱۱) نشان داده شده‌است. با توجه به مقدار ستون P-value عوامل $RCO$ و بلوک در معیار اول خیلی مؤثر هستند، ولی تأثیر عامل $TCO$ و اثر متقابلی عوامل مهم نیستند که این نتایج منطبق با نتایج حاصل از نمودارها است. ازآنجا که اثر بلوک تأثیر طرح آزمایش را نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به تأثیر زیاد آن در نتیجه تحلیل، می‌توان بار دیگر نتیجه گرفت که نوع طرح آزمایش در کیفیت کالیبراسیون اثر مهمی دارد که این موضوع مؤید یافته‌های بخش قبل است.




**شکل ۷: نمودار اثر متقابل عوامل برای معیار اوّل.**




**شکل۸: نمودار اثر عوامل برای معیار اول.**

**جدول ۱۱: تحلیل واریانس برای معیار اول.**

| منبع | DF | مجموع مربعات | F | P-value |
|---|---|---|---|---|
| Blocks | 8 | 21829567 | 3.14 | 0.003 |
| RCO | 4 | 304355683 | 87.49 | 0.000 |
| TCO | 3 | 36917 | 0.01 | 0.998 |
| RCO*TCO | 12 | 3814820 | 0.37 | 0.974 |
| Error | 152 | 132195350 | | |
| Total | 179 | 462232337 | | |

معیار دوم با فرض اینکه شبیه‌ساز پرواز می‌خواهد بر اساس انحراف سمت کالیبره شود، تعریف شده‌است. با توجه به اینکه در کالیبراسیون قدر مطلق انحراف سمت مهم است، رابطه (۱۰) به صورت زیر تعریف شده است:

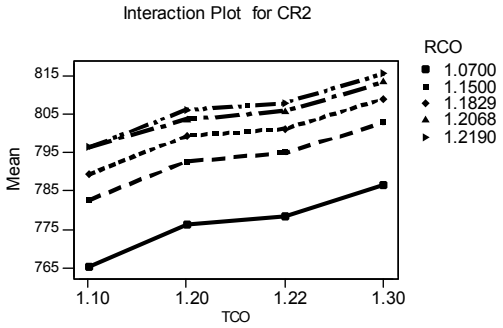
$$E_{A_{jk}} = \left| AR_i - AS_{jk} \right| \text{ for } i=1,\ldots,9;\ j=1,\ldots,5;\ k=1,\ldots,4 \qquad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰) $AR_i$ انحراف سمت زاویه ارتفاع $i$ام و $AS_{i_{jk}}$ انحراف سمت در زاویه ارتفاع $i$ و سطح $j$ ام عامل $RCO$ و سطح $k$ام عامل $TCO$ است. حال می‌توان معیار دوم را مطابق با رابطه (۱۱) تعریف کرد:

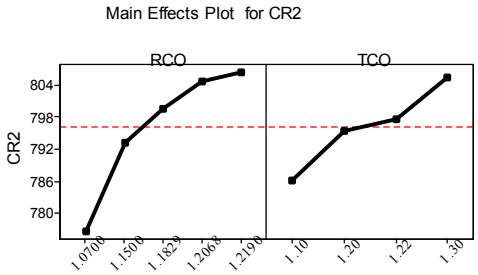
$$CR2_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{9} E_{A_{i_{jk}}}}{9} \qquad \forall j,k \qquad (۱۱)$$

از نمودار اثرعوامل و اثر متقابل می‌توان برای انتخاب سطح بهینه عوامل با کمینه‌سازی معیار دوم استفاده کرد. نمودارهای مربوطه به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) ارایه شده‌است. همچنین برای انجام سایر تحلیل‌های لازم می‌توان از جدول تحلیل واریانس در جدول (۱۲) استفاده کرد. با ملاحظه شکل (۹) می‌توان گفت:

(۱) اثر متقابل عوامل، معنی‌دار نیست که این موضوع با توجه به مقدار P-value مربوط به RCO*TCO در جدول (۱۲) به طور کامل مشهود است.




**شکل ۹: نمودار اثر متقابل عوامل براي معيار دوّم.**




**شکل ۱۰: نمودار اثر عوامل براي از معيار دوّم.**

(۲) تأثير بهترين تنظيم سطوح عوامل نسبت به بدترين تنظيم در ميانگين در حدود ۵۰ متر است. گرچه اين مقدار از منظر آماري معني‌دار است، ولي از منظر عملياتي خيلي قابل توجه به نظر نمي‌رسد. با توجه به اين نتايج ممكن است تصور شود خروجي شبيه‌ساز از منظر انحراف سمت با نتايج آزمايش‌هاي ميداني اختلاف چنداني ندارد كه با بررسي خطاي انحراف سمت آزمايش‌ها، اين موضوع رد شد. بنابراين انحراف سمت شبيه‌ساز، حساسيت زيادي نسبت به اين دو عامل كاليبراسيون نداشته و لازم است عامل يا عوامل جديدي براي كاليبراسيون آن تعريف كرد. با استفاده از ستون P-value در جدول (۱۲) مي‌توان گفت اثر بلوک و هر دو عامل در معيار دوم بامعني است. سطح بهينه عامل‌ها با ملاحظه شكل (۱۰) برابر با $RCO = 1.07, TCO = 1.1$ به دست مي‌آيد.

**جدول ۱۲: تحليل واريانس براي معيار دوم.**

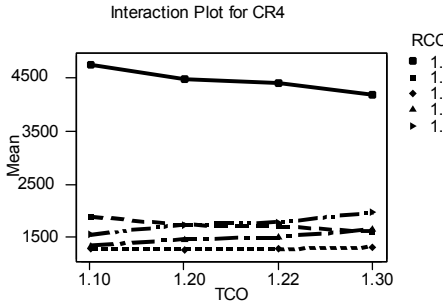
| منبع | DF | مجموع مربعات | F | P-value |
|---|---|---|---|---|
| Blocks | 8 | 107417158 | 8.4E+04 | 0.000 |
| RCO | 4 | 20782 | 32.61 | 0.000 |
| TCO | 3 | 8553 | 17.90 | 0.000 |
| RCO*TCO | 12 | 57 | 0.03 | 1.000 |
| Error | 152 | 24217 | | |
| Total | 179 | 107470767 | | |

شبيه‌ساز مورد نظر را مي‌توان نسبت به دو معيار خطاي برد و انحراف سمت، كاليبره كرد. معيار سوم بر اساس كمينه‌سازي ميانگين فاصله پله‌اي نقاط اصابت آزمايش‌هاي ميداني از نقاط اصابت حاصل از آزمايش‌هاي شبيه‌ساز كاليبره‌نشده مطابق رابطه (۱۲) تعريف شده‌است كه يک معيار خطاي دوبعدي است.

$$CR\_3_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{9} (E_{R_{i\,jk}} + E_{A_{i\,jk}})}{9} \qquad \forall j,k \qquad (۱۲)$$

معيار چهارم بر اساس ميانگين فاصله اقليدسي نقاط اصابت آزمايش‌هاي ميداني از نقاط اصابت حاصل از آزمايش‌هاي شبيه‌ساز كاليبره‌نشده مطابق رابطه (۱۳) تعريف شده‌است.

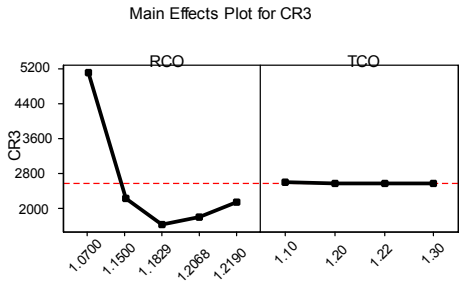
$$CR\_4_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{9} \sqrt{(E^2_{R_{i\,jk}} + E^2_{A_{i\,jk}})}}{9} \qquad \forall j,k \qquad (۱۳)$$



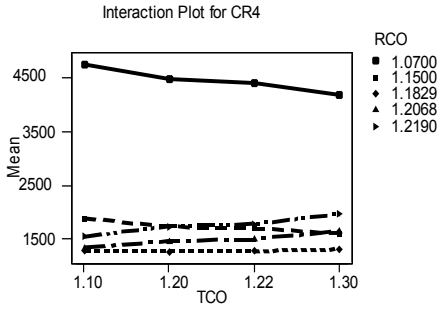

**شکل۱۱: نمودار اثر متقابلي عوامل براي معيار سوّم.**

با در نظر گرفتن معيار سوم و با استفاده از نمودار اثر متقابل عوامل (شكل (۱۱)) و نمودار اثر عوامل (شكل(۱۲)) و تحليل واريانس، سطح بهينه عوامل برابر با $RCO = 1.1829, TCO = 1.2$ به دست مي‌آيد كه مشابه مقادير به دست آمده با معيار اول است. به ظاهر رويكرد پيشنهادي به نتيجه‌اي كه در بخش قبل با استفاده از روش سعي و خطا به دست آمده بود، منجر شد. در حين بررسي‌هاي رويكرد پيشنهادي ملاحظه شد كه عوامل كاليبراسيون اثر متقابل ندارند. در صورت وجود اثر متقابل بين عوامل تخمين مقدار بهينه آنها با روش سعي و خطا خيلي سخت و شايد غيرممكن باشد. همچنين در صورتي كه كاليبراسيون شبيه‌ساز بر اساس دو يا چند معيار به صورت همزمان مدنظر باشد به طور حتم انجام آن با روش سعي و خطا مشكل خواهد شد. رويكرد پيشنهادي علاوه بر مزيت نظام‌مند بودن و ارايه اطلاعات درباره اثر متقابل و

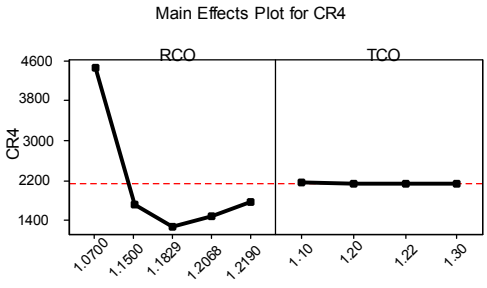
روابط بين عوامل و معيار تصميم‌گيري، مشكلات روش سعي و خطا را نيز مرتفع مي‌كند.




**شكل۱۲: نمودار اثر عوامل براي معيار سوم.**



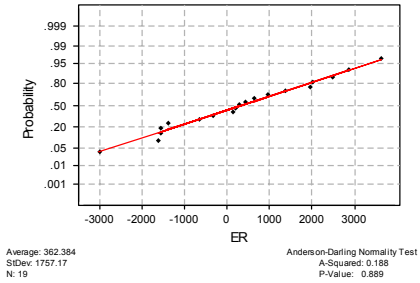

**شكل۱۳: نمودار اثر متقابلي عوامل براي معيار چهارم.**



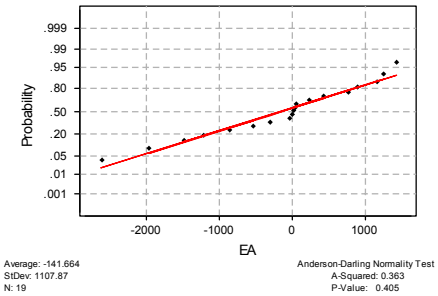

**شكل۱۴: نمودار اثر عوامل براي معيار چهارم.**

## بررسي كيفيت شبيه‌ساز كاليبره شده V

در بخش‌هاي قبل با بررسي نوع طرح آزمايش براي كاليبراسيون، آزمايش‌هاي مورد نياز با يک شبيه‌ساز مبنا انجام و شبيه‌ساز V كاليبره شد. حال اين سؤال مطرح مي‌شود كه كفايت شبيه‌ساز كاليبره‌شده V براي توصيف نتايج آزمايش‌هاي واقعي چگونه است و چگونه مي‌توان اين مقوله را بررسي كرد كه در ادامه به اين موضوع مي‌پردازيم.




**شكل۱۵: آزمون اندرسون- دارلينگ براي نرمال بودن خطاي برد .**




**شكل۱۶: آزمون اندرسون-دارلينگ براي نرمال بودن خطاي انحراف سمت.**

با استفاده از اطلاعات ۱۹ شليک ميداني در دسترس، آزمايش‌هاي شبيه‌ساز بار دیگر انجام و برد و انحراف سمت نقاط اصابت از شبيه‌سازV استخراج شد. براي مقايسه كيفيت نتايج شبيه‌ساز با نتايج آزمايش‌هاي ميداني دو شاخص خطاي برد و خطاي انحراف سمت به ترتيب مطابق روابط(۱٤) و (۱۵)زير استفاده شده‌است.

$$E_{R_n} = R_n - S_n \qquad (۱٤)$$

خطاي برد

كه در آن $S_n$ برد حاصل از آزمايش $n$ ام شبيه‌ساز و $R_n$ برد حاصل از شليک ميداني $n$ ام است.

$$E_{A_n} = AR_n - AS_n \qquad (۱۵)$$

خطاي انحراف سمت

كه در آن $AS_n$ انحراف سمت حاصل از آزمايش $n$ ام شبيه‌ساز و $AR_n$ انحراف سمت حاصل از شليک ميداني $n$ ام است. با استفاده از شاخص‌هاي تعريف شده خطاي برد و انحراف سمت هر بازه برد محاسبه شده است.

**بررسي ويژگي‌هاي آماري خطاي برد و انحراف سمت**

از آنجا كه مدل توزيع خطاها در تحليل واريانس و آزمون فرض‌هاي ارائه شده، نقش اساسي بازي مي‌كند، با استفاده از آزمون‌هاي مختلف، نرمال بودن توزيع خطاها با استفاده از نرم‌افزار Minitab مورد بررسي قرار گرفت. نرمال بودن توزيع خطاي برد و خطاي انحراف سمت با دو آزمون اندرسون–دارلينگ (شكل هاي ۱۵و ۱۶) و كالموگروف-اسميرونف بررسي شد كه با توجه به نتايج اين آزمون‌ها نمي‌توان فرض نرمال بودن خطاها را رد كرد.

**بررسي معنادار بودن تقسيم برد به سه بازه كوتاه، متوسط و بلند**

**الف) بررسي خطاي برد**

با توجه به اينكه در عمل اغلب برد به سه بازه تقسيم مي‌شود، ابتدا با استفاده از تحليل واريانس، معناداربودن اين تقسيم‌بندي مورد بررسي قرار گرفت. در اين بررسي برد به عنوان يك عامل سه سطحي در نظر گرفته شد و آزمون‌هاي آماري معيني با استفاده از نرم‌افزارMinitab انجام گرفت كه در ادامه نتايج آن ارائه شده است. فرض صفر آن است كه ميانگين خطاي برد سه بازه با هم برابر است و فرض $H_1$: آن است كه حداقل يكي از سه ميانگين خطاي برد با ساير ميانگين خطاها متفاوت است. با توجه به اينكه در جدول(۱۳) مقدار P-value>0.05 است، نمي‌توان فرض $H_0$ را رد كرد. يعني ميانگين خطاي برد در سه بازه با هم تفاوت معناداري ندارند.

**جدول ۱۳: تحليل واريانس خطاي برد در سه بازه.**

| منبع | DF | مجموع مربعات | ميانگين مربعات | F | P-value |
|---|---|---|---|---|---|
| برد | 2 | 1492498 | 746249 | 0.22 | 0.804 |
| خطا | 16 | 54085633 | 3380352 | | |
| كل | 18 | 55578131 | | | |

**ب) بررسي خطاي انحراف سمت**

در ادامه با هدف بررسي تأثير بازه برد روي خطاي انحراف سمت آزمايش‌ها، آزمون فرض زير انجام شد.

$H_0$: ميانگين خطاي انحراف سمت سه بازه با هم برابر است.

با استفاده از نتايج جدول (۱۴) فرض $H_0$ در سطح ۵ درصد رد نمي‌شود. با استناد به نتايج تحليل واريانس هر دو خطاهاي برد و انحراف سمت، شواهدي در دست نيست كه نتوان برد را به صورت يك متغير پيوسته در نظر گرفت. در نتيجه مي‌توان نقاط آزمايش را بر اساس يكي از طرح‌هاي آزمايش توزيع شده انتخاب كرد.

**جدول ۱۴: تحليل واريانس خطاي انحراف سمت.**

| منبع | DF | مجموع مربعات | ميانگين مربعات | F | P-value |
|---|---|---|---|---|---|
| برد | 2 | 5407600 | 2703800 | 2.59 | 0.106 |
| خطا | 16 | 16685323 | 1042833 | | |
| كل | 18 | 22092923 | | | |

**بررسي كفايت شبيه‌ساز V در توصيف ميانگين و واريانس شليک‌هاي ميداني**

براي پاسخگويي به اين سؤال كه آيا شبيه‌ساز V كفايت لازم براي توصيف ميانگين و واريانس شليک‌هاي ميداني را دارد؟ برابري ميانگين و واريانس خطاي برد و انحراف سمت شليک‌هاي ميداني با آزمايش‌هاي شبيه‌سازV بررسي شد. با توجه به بي‌تأثير بودن تقسيم برد به بازه‌هاي سه‌گانه و به دليل فراهم كردن داده‌هاي كافي براي بررسي، ۱۹ شليک واقعي در دسترس به صورت يكپارچه مورد تحليل قرار گرفت.

آزمون‌هاي زير براي مقايسه واريانس خطاي برد و خطاي انحراف سمت شليک‌هاي ميداني و آزمايش‌هاي شبيه‌ساز طراحي شدند.

$H_0$: واريانس برد شليک‌هاي ميداني با واريانس برد آزمايش‌هاي شبيه‌ساز برابر است.

در جدول(۱۵) $S_S = 12517m$ و $S_F = 12791m$ $F_0 = \frac{12517^2}{12791^2} = 0.95$ است. در اينجا $S_F$ نشان‌دهنده انحراف معيار شليک‌هاي واقعي در دسترس، $S_S$ نشان‌دهنده انحراف معيار آزمايش‌هاي شبيه‌ساز V و $F_0$ نشان‌دهنده آماره $F$ است. همچنين ناحيه پذيرش $H_0$ برابر با $F_{0.975,18,18} < F < F_{0.025,18,18}$ يعني $0.3853 < F_0 < 2.5956$ است. با توجه به مقدار $F_0$ فرض $H_0$ رد نمي‌شود. آزمون فرض ديگر عبارت است از $H_0$: واريانس انحراف سمت شليک‌هاي ميداني با واريانس آزمايش‌هاي شبيه‌ساز برابر است.

از آنجا كه در جدول (۱۶) $S_F = 758.96m$ و $S_S = 1001.7m$ و $F_0 = \frac{1001.7^2}{758.96^2} = 1.74$ و همچنين ناحيه پذيرش $H_0$ همان فاصله $0.3853 < F_0 < 2.5956$ است، فرض $H_0$ رد نمي‌شود.

همچنين ميانگين برد و انحراف سمت شليک‌هاي ميداني و شبيه‌سازV با استفاده از آزمون‌هاي زير مقايسه شده‌است.

$H_0$ : ميانگين برد شليک‌هاي ميداني با آزمايش‌هاي شبيه‌ساز برابر است.

با توجه به نتيجه آزمون T (در جدول (۱۵))فرض $H_0$ در سطح $\alpha = 0.05$ رد نمي‌شود. يعني تفاوت معناداري بين ميانگين برد شليک‌هاي ميداني و شبيه‌سازV وجود ندارد.

**جدول ۱۵: نتايج آزمون T براي مقايسه ميانگين برد شليک‌هاي ميداني و شبيه‌سازV.**

| | N | ميانگين | انحراف معيار | انحراف معيار ميانگين |
|---|---|---|---|---|
| برد ميدان | 19 | 62441 | 12791 | 2935 |
| برد شبيه‌ساز | 19 | 62072 | 12517 | 2872 |

P-Value = 0.929

آزمون فرض ديگر عبارت است از $H_0$ : ميانگين انحراف سمت در شليک‌هاي ميداني و در آزمايش‌هاي شبيه‌ساز برابرند. بر اساس نتايج آزمون T (در جدول (١٦)) فرض $H_0$ در سطح $\alpha = 0.05$ رد نمي‌شود. يعني تفاوت معناداري بين ميانگين خطاهاي انحراف سمت در شبيه‌ساز و آزمايش‌هاي ميداني وجود ندارد. با استفاده از نتايج آزمون‌هاي ارائه‌شده شواهدي دال بر عدم كفايت شبيه‌ساز V در دسترس نيست.

**جدول ۱۶: نتايج آزمون T براي مقايسه ميانگين انحراف سمت آزمايش‌ها.**

| | N | ميانگين | انحراف معيار | انحراف معيار ميانگين |
|---|---|---|---|---|
| انحراف‌سمت ميدان | 19 | 1063 | ۷۵۸.۹۶ | 174 |
| انحراف‌سمت شبيه‌ساز | 19 | 1230 | ۱۰۰۱.۷ | 230 |

P-Value = 0.566

## نتيجه‌گيري

با استناد به نتايج تحليل‌هاي انجام‌شده مي‌توان گفت تأثير نوع طرح آزمايش بر كيفيت كاليبراسيون معني‌دار است و براي شبيه‌ساز پرواز شش درجه آزادي مورد نظر طرح آزمايش بر اساس توزيع مثلثي مناسب است. همچنين توزيع مثلثي از منظر ميزان اطلاعات نسبت به طرح يكنواخت و طرح تجربي نيز بهتر است.

از آنجا كه منطقي براي انتخاب تعداد آزمايش‌هاي مورد نياز كاليبراسيون در دست نبود، با استفاده از تابع انتروپي، روشي براي آن پيشنهاد شد. همچنين رويكردي براي بررسي كفايت شبيه‌ساز كاليبره شده مبتني بر آزمون فرض پايه‌گذاري شد.

همان طوري كه در بخش‌هاي قبل گفته شد، به دليل نبود امكان انجام شليک‌هاي ميداني، بررسي‌ها با استفاده از يک شبيه‌ساز مبنا انجام شد. در صورتي كه شليک‌هاي ميداني انجام شود، امكان دارد نتايج كاليبراسيون بهبود يابد.

تخمين عوامل كاليبراسيون به صورت سعي و خطا داراي مشكلاتي از قبيل نبود امكان تشخيص اثر متقابل عوامل و ناتواني كاليبراسيون با بيش از يک معيار است. رويكرد پيشنهادي علاوه بر مرتفع كردن مشكلات روش سعي و خطا، رويكردي نظام‌مند است و اطلاعات ارزشمندي در اختيار مي‌گذارد. به طور كلي كفايت شبيه‌ساز كاليبره‌شده با روش پيشنهادي خوب ارزيابي شد. گرچه در بعضي از آزمايش‌ها، سمت اصابت آزمايش‌هاي شبيه‌ساز با سمت اصابت شليک‌هاي ميداني مطابقت ندارد. به نظر مي‌رسد انحراف سمت آزمايش‌هاي شبيه‌ساز با عوامل تعريف شده قابل كاليبره كردن نيست.

## مراجع


1- Montgomery, D.C. (2001). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, New York.

2- Myers, R.H. and Montgomery, D.C. (2002). *Response Surface Methodology*. John Wiley & Sons, New York.

3- Santner, T.J., Williams, B.J. and Notz, W.I (2003). *The Design and Analysis of Computer Experiments*. Springer-Verlag Inc., New York.

4- Koehler, J.R. and Owen, A.B. (1996). “Computer experiments.” *Handbook of statistics.* Vol. 13, Edited by Ghosh, S., Rao, C., Elsevier Science.

5- Sacks, J., Welch, W.J., Mitchell, J.J. and Wynn, H.P. (1989). "Design and analysis of computer experiments." Statistical Science, 4(4), PP. 409-435.

6- Butler, N.A. (2001), "Optimal and orthogonal latin hypercube design for computer experiments." Biometrika, 88(3), PP. 847-857.

7- Mckay, M.D., Beckman, R.J. and Conover, W.J. (1979), "A comparison of three method for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code." Technomertica, 21(2), PP. 239-245.

8- Welch, W.J., Buck, R.J., Sacks, J. and et, al. (1992). "Screening, predicting and computer experiments." Technimetrics, 34(1), 1992, PP. 15-25.

9- Sacks,J., Schiller, S.B. and Welch, W.J. (1989), "Designs for computer experiments." Technomerics, 31(1), PP. 41-47.

10- Houston, D., Ferreira, S. and Montogomery, D.C. (2005), "Using unreplicated $2^{k-r}$ design for characterizing moderately dimensioned deterministic computer models." Quality and Reliability Engineering International, 21, PP. 809-824.

11- Li, R. (2002) "Model selection for analysis of uniform design and computer experiments." International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 9(4), PP. 367-382.

12- kennedy, M.C. and O'Hagan, A. (2001) "Bayesian calibration of computer models." Journal of Royal Statistical Society, (Series B), 63(3), PP. 425-464.

13- Bayarri, M.J., Berger, J.O., Higdon, D., Kennedy, M.C. and et al. (2002). "A Framework for validation of computer models." Technical Report, 128, National Institute of Statistical Science (NISS), www.niss.org.

14- *Military Handbook*, (1990). "Design of aerodynamically stabilized free rockets." MIL-HDBK_762 (MI).

15- MATLAB Statistical Toolbox Version 6.5 (2002), Math Works Inc.

16- Atkinson, A.C., Donev, A.N. (1992). *Optimum Experimental Designs* Oxford University Press.

17- Lee, J. (1998). "Constrained maximum-entropy sampling." Operations Research, 46(5), PP. 655-664.

18- Papoulis, A. and Pillai, S.U. (2002). *Probability, Random Variables and stochastic processes* 4th edition, McGraw-Hill Companies, Inc.

## واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1- Deterministic
2- Latin Hypercube
3- Paired T-Test
4- Information Matrix