



راهنمای ۷ مرحله‌ای برای محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری

7 STEPS TO CALCULATE Measurement Uncertainty

By Rick Hogan

ترجمه: ProwindingTech_Admin



راهنمای ۷ مرحله‌ای برای محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری

ISOBudgets LLC © 2015 شرکت

اثر: ریک هوگان

۷ مرحله برای محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری

نویسنده: ریچارد هوگان | © ۲۰۱۵ شرکت ISOBudgets LLC. کلیه حقوق محفوظ است.

فرآیند محاسبه عدم قطعیت:

۱. مشخص کردن فرآیند و معادله
۲. شناسایی و توصیف منابع عدم قطعیت
۳. تعیین کمیت مؤلفه‌های عدم قطعیت
۴. تبدیل مؤلفه‌های عدم قطعیت به معادل انحراف معیار
۵. محاسبه عدم قطعیت ترکیبی استاندارد
۶. محاسبه عدم قطعیت گسترش‌یافته
۷. ارزیابی تناسب عدم قطعیت

حق نشر © ۲۰۱۵ شرکت ISOBudgets LLC

کلیه حقوق محفوظ است. این کتاب یا هر بخشی از آن بدون اجازه کتبی ناشر، به هیچ وجه نباید بازتولید یا مورد استفاده قرار گیرد، مگر در قالب نقل قول کوتاه در یک نقد کتاب.

چاپ اول، ۲۰۱۵

شرکت ISOBudgets LLC

صندوق پستی ۲۴۵۵

یورکتاون، ویرجینیا ۲۳۶۹۲

ایالات متحده آمریکا

وبسایت: <http://www.isobudgets.com>

مقدمه

محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری آسان نیست. در واقع، من هر روز با افرادی صحبت می‌کنم که در تخمین عدم قطعیت مشکل دارند.

به همین دلیل تصمیم گرفتم این راهنما را تهیه کنم تا فرآیند اختصاصی هفت‌مرحله‌ای خودم برای محاسبه عدم قطعیت را در اختیار شما بگذارم.

در این راهنما، شما خواهید آموخت که چگونه در هفت مرحله ساده، عدم قطعیت اندازه‌گیری را محاسبه کنید. همچنین یاد می‌گیرید که چه اطلاعاتی برای انجام این کار نیاز دارید، چگونه عوامل مؤثر بر عدم قطعیت را شناسایی کنید، و چگونه محاسبات خود را ارزیابی کنید تا از برآورد بیش از حد یا کمتر از حد واقعی جلوگیری شود. علاوه بر این، برخی از نکات اختصاصی من را برای محاسبه حرفه‌ای عدم قطعیت با شما به اشتراک می‌گذارم.

البته این راهنما یک دستورالعمل جامع «گام‌به‌گام» نیست و به همه پرسش‌های شما پاسخ نخواهد داد. بلکه باید از آن به عنوان یک مرجع سریع برای ساده‌سازی فرآیند برآورد عدم قطعیت به هفت گام استفاده کرد و با برخی از نکات شخصی من آشنا شد که در زمان محاسبه عدم قطعیت به کار می‌برم.

پس این راهنما را بخوانید و از توصیه‌های من بهره ببرید تا بتوانید عدم قطعیت را محاسبه کنید. اگر سؤال داشتید، حتماً با من تماس بگیرید. همچنین می‌توانید از این راهنما برای تدوین روش اجرایی عدم قطعیت در آزمایشگاه خود استفاده کنید.

مرحله ۱ - مشخص کردن فرآیند و معادله

قبل از آنکه مستقیماً وارد محاسبه عدم قطعیت شوید، بهتر است یک برنامه‌ریزی داشته باشید. اولین بخش برنامه شما باید شناسایی فرآیند یا سیستم اندازه‌گیری باشد که می‌خواهید ارزیابی کنید.

برای شروع، به این پرسش‌ها پاسخ دهید:

- چه چیزی را اندازه‌گیری می‌کنید؟
- چگونه آن را اندازه‌گیری می‌کنید؟
- از چه تجهیزاتی استفاده خواهید کرد؟
- چه کسی اندازه‌گیری را انجام می‌دهد؟
- اندازه‌گیری‌ها کجا انجام می‌شود؟
- چه عواملی ممکن است بر نتایج اندازه‌گیری اثر بگذارند؟

پس از پاسخ به این سؤالات، پاسخ‌ها را برای شناسایی فرآیند اندازه‌گیری که در حال ارزیابی آن هستید به کار ببرید. وقتی فرآیند مشخص شد، می‌توانید به گام بعدی بروید.

اگر در حال انجام اندازه‌گیری غیرمستقیم هستید که نیاز دارد نتایج را با استفاده از معادله محاسبه کنید، باید معادله مورد استفاده را دقیقاً مشخص کنید. این امر مهم است زیرا هر متغیر موجود در معادله عدم قطعیت خاص خود را دارد که مستقیماً بر عدم قطعیت نتیجه نهایی اثر می‌گذارد.

به عنوان مثال، استفاده از دستگاه Dead Weight Tester یا کالیبراسیون ترانسدیوسرهای گشتاور و مقاومت‌های استاندارد، همگی نیازمند استفاده از یک معادله برای محاسبه نتیجه به منظور مقایسه هستند. برای برآورد عدم قطعیت، باید معادله را تجزیه کنید و عدم قطعیت هر متغیر را ارزیابی کنید.

مرحله ۲ - شناسایی و توصیف منابع عدم قطعیت

حالا که فرآیند اندازه‌گیری خود را می‌دانید، باید عوامل مؤثر بر عدم قطعیت در نتایج اندازه‌گیری را شناسایی کنید. این کار همیشه آسان نیست و ممکن است باعث ناامیدی شود. پس آرامش خود را حفظ کنید، صبور باشید و به جستجو ادامه دهید. ممکن است از تعداد عوامل اثرگذار بر نتایج خود شگفت‌زده شوید.

پیش از شروع، توصیه می‌کنم یک کتاب یا راهنما درباره فرآیند اندازه‌گیری مورد ارزیابی پیدا کنید. کتاب‌های فیزیک، شیمی و مهندسی می‌توانند برای درک اطلاعات پس‌زمینه و جزئیات فرآیند مفید باشند. اگر کتاب‌های جدید گران هستند، احتمالاً می‌توانید نسخه‌های کارکرده را با قیمت مناسب از وبسایت‌هایی مثل eBay، Amazon، Chegg یا Half.com تهیه کنید.

منابع دیگری که می‌توانید در نظر بگیرید، روش‌ها و استانداردهای ASTM و ISO هستند. اما اگر منابع رایگان را ترجیح می‌دهید (مثل من)، شاید بخواهید به وبسایت مؤسسات ملی اندازه‌شناسی مانند NIST، NPL و BIPM مراجعه کنید. این وبسایت‌ها ممکن است راهنماهای قابل دانلود مرتبط با فرآیندهای اندازه‌گیری خاص شما داشته باشند.

اگر در حال ارزیابی یک معادله هستید، فرآیند کمی متفاوت است. باید هر متغیر موجود در معادله را شناسایی کنید و فکر کنید چه عواملی بر هر یک اثر می‌گذارند.

به عنوان مثال، اگر در حال ارزیابی کالیبراسیون یک ترانسدیوسر گشتاور هستید، ابتدا معادله زیر را می‌نویسید:

$$M = r \times F \times \sin(\theta)$$

که در آن:

- M = ممان نیرو (گشتاور)
- r = شعاع از مرکز تکیه‌گاه
- F = نیروی اعمال شده
- θ = زاویه نیروی اعمال شده

وقتی معادله را بیشتر ارزیابی می‌کنید، شروع به در نظر گرفتن عوامل دیگری می‌کنید که بر آن اثر می‌گذارند. در این مثال، شعاع بازوی گشتاور و کابل، جرم وزنه‌ها و سینی، و گرانش محلی را در نظر می‌گیریم.

اگر بخواهیم دقیق‌تر شویم، معادله می‌تواند به این شکل گسترش یابد:

$$M = (r_{arm} + \frac{1}{2} r_{cable}) \times (m_{pan} \cdot g_L + m_{wgt} \cdot g_L) \times \sin(\theta)$$

که در آن:

- r_{arm} = شعاع چرخ/بازوی گشتاور
- r_{cable} = شعاع کابل
- m_{pan} = جرم سینی وزنه‌ها
- m_{wgt} = جرم وزنه‌های اعمال شده
- g_L = گرانش محلی
- θ = زاویه نیروی اعمال شده

حالا که معادله و متغیرها را شناسایی کرده‌اید، می‌توانید تحقیق کنید که چه عواملی باعث تغییر یا نوسان در هر متغیر می‌شوند.

برای مثال، تغییرات دما می‌تواند باعث انبساط یا انقباض خطی شعاع شود یا اصطکاک و کشش کابل می‌تواند مقدار نیروی اعمالی را تغییر دهد.

ارزیابی معادلات گاهی آسان است، اما بسته به پیچیدگی معادله می‌تواند سخت شود. دانستن قوانین انتشار عدم قطعیت در گام ۵ به کار می‌آید.

مرحله ۳ - تعیین کمیت مؤلفه‌های عدم قطعیت

قبل از آنکه بتوانید عدم قطعیت اندازه‌گیری را محاسبه کنید، باید اندازه هر عامل مؤثر را مشخص کنید. برای این کار ممکن است لازم باشد کاهش داده‌ها (Data Reduction) و تحلیل داده انجام دهید.

برای شروع، جمع‌آوری موارد زیر می‌تواند مفید باشد:

- گزارش‌های کالیبراسیون
- مطالعات تکرارپذیری و بازتولیدپذیری (R&R)
- نتایج آزمایش‌ها
- دفترچه‌های راهنمای سازنده و مشخصات فنی
- اسناد فنی و راهنماها
- مقالات منتشر شده، مطالعات و مقالات ژورنالی

با استفاده از این موارد، باید بتوانید میزان عدم قطعیت هر منبع را تعیین کنید. اگر به کمک نیاز داشتید، می‌توانید با من تماس بگیرید یا مرا برای تحلیل داده‌هایتان استخدام کنید.

یکی از روندهایی که در پنج سال گذشته مشاهده کرده‌ام این است که نهادهای اعتباردهی و ارزیابان می‌خواهند داده‌های نوع A را در تحلیل عدم قطعیت شما ببینند. این داده‌ها از مطالعات تکرارپذیری و بازتولیدپذیری به دست می‌آیند. اگر این داده‌ها را شامل نکرده‌اید، توصیه می‌کنم آن را در اولویت قرار دهید.

می‌دانم ممکن است بپرسید: «چطور بزرگی آن عوامل عجیب‌وغریبی را که در کتاب یا مقاله‌ای خوانده‌ام یا ارزیابم گفته، تعیین کنم؟»

احتمالاً شما یک آزمایشگاه ملی مانند NIST نیستید که بتوانید این عوامل فیزیکی را مستقیماً آزمایش کنید. در این موارد، آزمایش‌های شبیه‌سازی (Simulation) می‌تواند مفید باشد.

آزمایش شبیه‌سازی یعنی برآورد ریاضی نتایج با استفاده از معادلات و تغییر متغیرهای ورودی، و مشاهده تغییر متغیر خروجی.

ممکن است سخت به نظر برسد، اما شبیه‌سازی می‌تواند به سادگی در یک فایل Excel انجام شود. مثلاً همان مثال گام ۲ را در نظر بگیرید، یک محاسبه‌گر در Excel بسازید و یک متغیر ورودی را در یک زمان تغییر دهید و خروجی را پایش کنید.

مثلاً اگر بدانید دمای آزمایشگاه شما چه قدر تغییر می‌کند، می‌توانید میزان انبساط خطی بازوی گشتاور را محاسبه کنید و تغییر گشتاور را به دست آورید.

وقتی داده‌ها را تحلیل کردید و بزرگی هر منبع عدم قطعیت را به دست آوردید، از یک جدول بودجه عدم قطعیت استفاده کنید تا عدم قطعیت کل خود را محاسبه کنید. بودجه عدم قطعیت ابزار بسیار خوبی برای سازماندهی داده‌ها و نمایش نحوه محاسبه برآورد عدم قطعیت است.

UNCERTAINTY BUDGETS									
Pressure Source/Measure									
Ruska 2465 Dead Weight Tester w/ 2460-915 Piston Gauge- ID# T1949, L-125, & 12126									
Range: 0.1 psi to 15 psi									
Test Point: 1.5 psig									
Uncertainty Analysis: CMC (Calculation and Measurement Capability)									
	Sensitivity Coefficient	Value	Unit	Type	Distribution	Divisor	Std Uncertainty	Degrees of Freedom	Significance Level
	(y/x)	(x)					(y)	n	
Repeatability	1	0.000016	psig	A	Gaussian	1	0.0000	38	12.1%
Reproducibility	1	0.000042	psig	A	Gaussian	1	0.0000	2	65.8%
Stability	1	0.0000045	psig	B	Gaussian	1	0.0000	2	0.8%
Bias	1	0.0000000	psig	B	Gaussian	1	0.0000	1	0.0%
Drift	1	0.0000020	psig	B	Gaussian	1	0.0000	2	0.3%
Resolution	1	0.0000015	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	18-200	0.0%
Reference Standard	1	0.0000320	psig	B	Gaussian	2	0.0000	88	8.4%
Reference Std Stability	1	0.0000000	psig	B	Gaussian	2	0.0000	2	0.0%
Linearity	1	0.0000080	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	2	0.3%
Hysteresis	1	0.0000040	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	2	0.3%
Ambient Temperature Error	1	0.0000030	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	18-200	0.1%
Ambient Pressure Error	1	0.0000030	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	18-200	0.1%
Relative Humidity Error	1	0.0000006	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	18-200	0.0%
Mass Density Error	1	0.0000030	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	18-200	0.1%
Air Density Error	1	0.0000030	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	18-200	0.0%
Thermal Coefficient	1	0.0000000	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	18-200	0.0%
Deformation Coefficient	1	0.0000000	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	18-200	0.0%
Local Gravity Correction	1	0.0000000	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	18-200	0.1%
Pressure Head Correction	1	0.0000080	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	18-200	0.4%
Piston Area	1	0.0000000	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	18-200	0.2%
Piston Height Error	1	0.0000000	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	18-200	0.0%
Weight Set Uncertainty	1	0.0000037	psig	B	Rectangular	√3	0.0000	18-200	0.2%
Combined Uncertainty (RSS method)							0.000052	4.6	100.0%
Expansion Coefficient (k)							2.000		
Expanded Uncertainty [k=2]							0.000105		psig

مرحله ۴ - تبدیل مؤلفه‌های عدم قطعیت به معادل انحراف معیار

سخت‌ترین بخش تحلیل عدم قطعیت تمام شده است. حالا می‌توانید روی محاسبه تمرکز کنید. برای شروع، باید هر منبع عدم قطعیت را به معادل انحراف معیار تبدیل کنید.

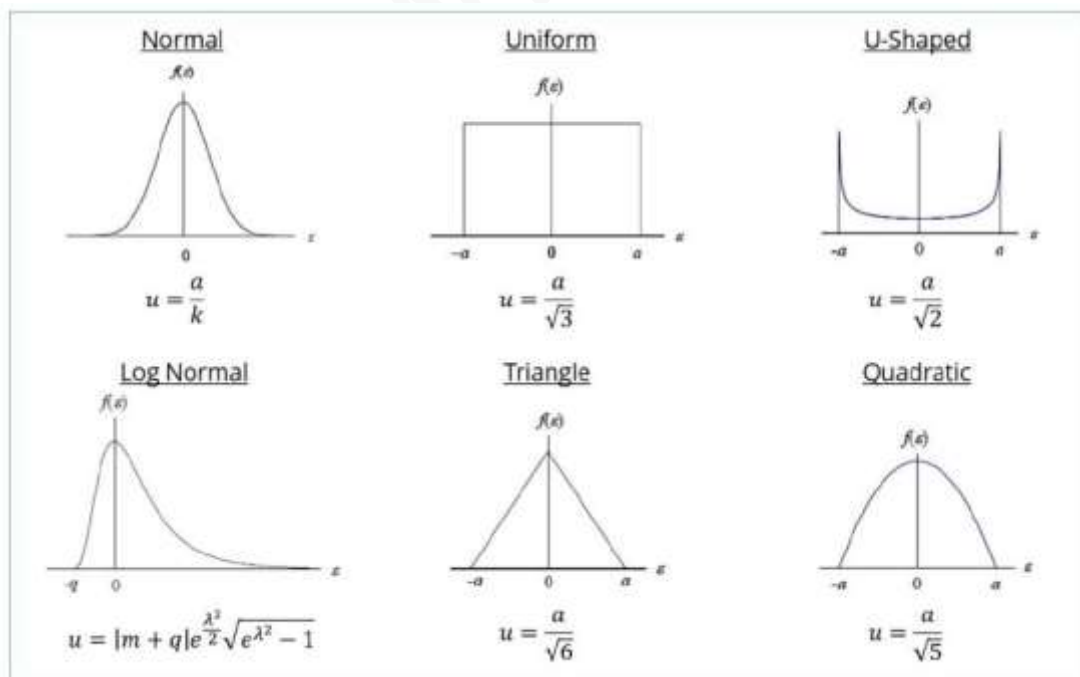
این کار با شناسایی یک توزیع احتمالاتی که پراکندگی داده شما را توصیف می‌کند آغاز می‌شود. برای هر منبع عدم قطعیت، یک توزیع مناسب انتخاب کنید. اگر مطمئن نیستید، بسیاری از افراد به صورت پیش‌فرض از توزیع یکنواخت (Rectangular) استفاده می‌کنند.

رایج‌ترین توزیع‌های احتمالاتی مورد استفاده عبارتند از:

- نرمال یا گاوسی
- یکنواخت یا مستطیلی
- مثلثی
- لگاریتمی نرمال
- درجه دوم (Quadratic)
- U شکل

وقتی توزیع را انتخاب کردید، معادله‌ای که آن را به انحراف معیار کاهش می‌دهد شناسایی کنید تا همه منابع به معادل ۱ سیگما برسند.

این کار را برای هر منبعی که در گام ۳ تعیین کرده‌اید انجام دهید.



مرحله ۵ - محاسبه عدم قطعیت ترکیبی استاندارد

بعد از آنکه همه منابع را به معادل انحراف معیار رساندید، نوبت به ترکیب آن‌ها می‌رسد. برای این کار، از روش «ریشه مجموع مربعات (RSS)» استفاده می‌کنید.

گام‌ها:

1. هر مقدار را به توان ۲ برسانید.
2. آن‌ها را جمع کنید.
3. از مجموع، جذر بگیرید.

معادله:

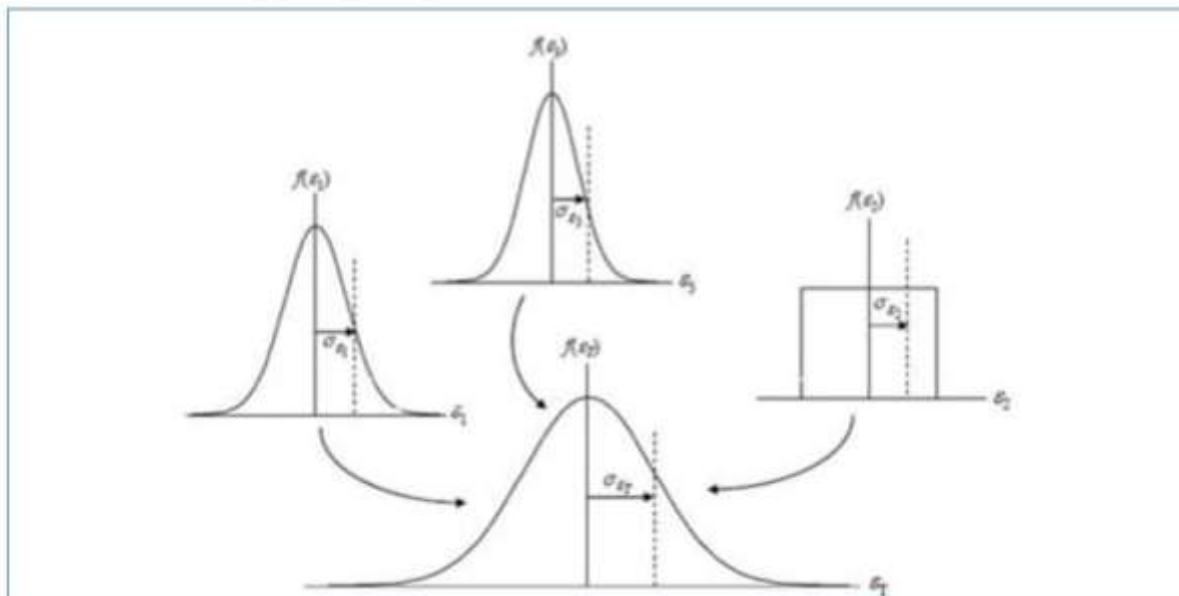
$$CU = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2}$$

یا به صورت دیگر:

$$CU = (u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2)^{1/2}$$

در Excel نیز می‌توانید از تابع $=SQRT(SUMSQ(cell1, cell2, \dots))$ استفاده کنید.

وقتی منابع عدم قطعیت را ترکیب می‌کنید، توزیع‌های احتمالاتی نیز ترکیب می‌شوند. طبق قضیه حد مرکزی، جمع متغیرهای تصادفی مستقل، به سمت توزیع نرمال میل می‌کند، حتی اگر توزیع اولیه آن‌ها متفاوت باشد.



مرحله ۶ - محاسبه عدم قطعیت گسترش یافته

حالا به مراحل پایانی نزدیک می شویم.

در این مرحله، عدم قطعیت ترکیبی را به سطح اطمینان قابل قبول گسترش می دهیم.

برای انطباق با الزامات استاندارد ISO/IEC 17025:2005، باید عدم قطعیت را به حدود ۹۵٪ گسترش دهید. بسیاری از افراد از ضریب گسترش $k=2$ استفاده می کنند که سطح اطمینان ۹۵/۴۵٪ را می دهد. همچنین می توانید از $k=1.96$ استفاده کنید که دقیقاً ۹۵٪ سطح اطمینان را فراهم می کند.

انتخاب با شماست، فقط مطمئن شوید در همه تحلیل های عدم قطعیت خود همان ضریب را استفاده کنید و دلیل انتخاب خود را بدانید تا در صورت لزوم بتوانید به ارزیاب توضیح دهید.

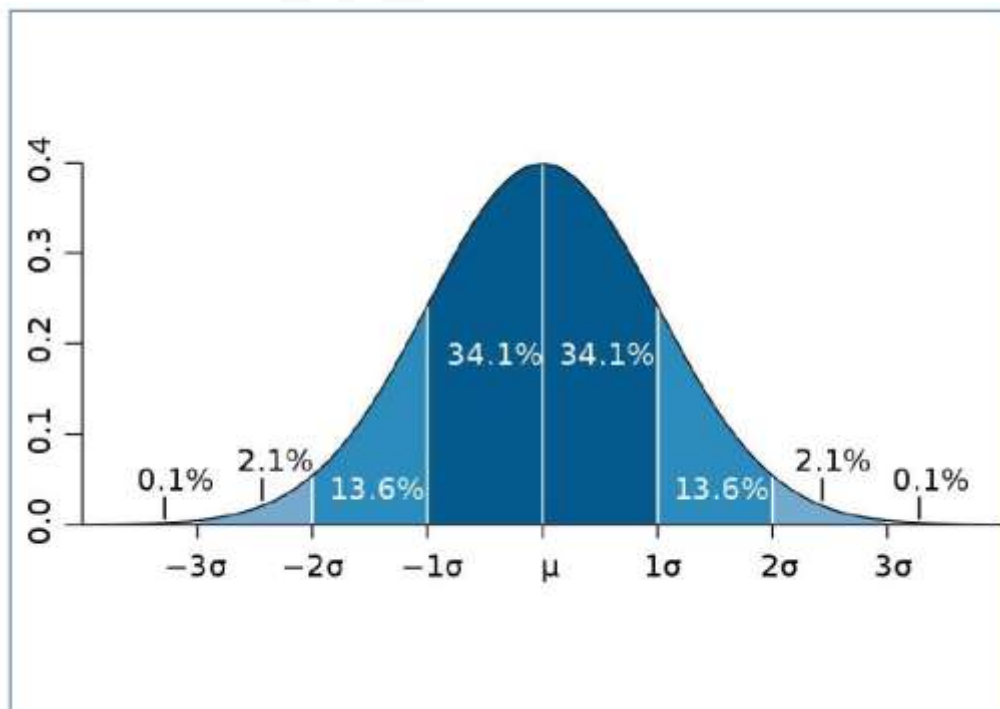
برای محاسبه، کافیت:

$$EU = k \times CU$$

که در آن:

- EU = عدم قطعیت گسترش یافته
- k = ضریب گسترش
- CU = عدم قطعیت ترکیبی استاندارد

به همین سادگی! حالا عدم قطعیت گسترش یافته را دارید و محاسبه تان کامل شده است. اما هنوز کار تمام نشده – باید بررسی کنید که این مقدار مناسب است یا خیر.



مرحله ۷ - ارزیابی تناسب عدم قطعیت

پس از محاسبه عدم قطعیت گسترش یافته، باید بررسی کنید که این برآورد به اندازه کافی نمایانگر فرآیند اندازه‌گیری شما هست یا نه، و آیا بیش از حد یا کمتر از حد واقعی نیست.

برای شروع ارزیابی، ابتدا بررسی کنید که عدم قطعیت شما بزرگ‌تر از عدم قطعیت استاندارد مرجع یا مقادیر موجود در گواهی کالیبراسیون تجهیزاتتان نباشد.

سپس، دامنه اعتبار (Scope) سایر آزمایشگاه‌ها را بررسی کنید. حداقل سه تا پنج دامنه اعتبار را مقایسه کنید و ببینید آیا مقادیر شما در محدوده منطقی آنهاست یا خیر. اگر اختلاف زیادی وجود دارد، ممکن است برآورد شما خیلی زیاد یا خیلی کم باشد.

بعد، پایگاه داده **BIPM Key Comparison Database** را بررسی کنید تا مطمئن شوید عدم قطعیت شما کمتر از مقادیر اعلام شده توسط مؤسسات ملی اندازه‌شناسی نباشد. شاید عجیب به نظر برسد، اما دیده‌ام که آزمایشگاه‌ها این اشتباه را می‌کنند.

در نهایت، یک مطالعه تکرارپذیری و بازتولیدپذیری در آزمایشگاه خود انجام دهید. بررسی کنید که نتایج این مطالعه از عدم قطعیت برآورد شده بیشتر نباشد - اگر باشد، یعنی برآوردتان کمتر از حد واقعی است.

ارزیابی برآورد عدم قطعیت بسیار حیاتی است. نمی‌خواهید پس از تمام زحمت محاسبه، در ارزیابی اعتبارسنجی متوجه شوید که اشتباه کرده‌اید. بهتر است کار سخت را از ابتدا درست انجام دهید تا از دردسر و کاغذبازی بعدی جلوگیری شود.

نتیجه‌گیری

در این راهنما، هفت مرحله برای محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری ارائه شد. اگرچه این یک دستورالعمل کامل «چگونه انجام دهیم» نیست، اما اطلاعات زیادی به شما می‌دهد تا خودتان بتوانید برآورد عدم قطعیت را انجام دهید.

منابع

- Castrup, H. (2007). *Distributions for Uncertainty Analysis*. Bakersfield, CA: Integrated Sciences Group.
- Miller, V. (2002). *NISTIR 6919: Recommended Guide for Determining and Reporting Uncertainties for Balances and Scales*. National Institute of Standards and Technology.
- United Kingdom Accreditation Service. (2012). *M3003: The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement*. Middlesex: UKAS.