



یادداشت فنی

خودکارسازی دقیق و سریع محاسبات تخصصی فرآوری مواد معدنی با ایجاد افزونه به نرم افزار صفحه گسترده اکسل

علیرضا قاسمی^۱، مصطفی مالکی مقدم^{۲*}

۱- مدیرعامل شرکت نوین لاینر، رفسنجان، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران

(دریافت: ۰۸ شهریور ۱۴۰۴، بازنگری: ۲۵ مهر ۱۴۰۴، پذیرش: ۱۶ آبان ۱۴۰۴)

چکیده

ارزیابی عملکرد فرایندها در صنایع معدنی و به ویژه در واحدهای فرآوری مواد معدنی بر اساس به کارگیری فرمول ها و روابط، گاهی پیچیده و طولانی است. نرم افزار Microsoft Excel به عنوان یکی از ابزارهای اصلی محاسبات و تحلیل داده در علوم و صنایع، همواره مورد استفاده گسترده مهندسان و پژوهشگران قرار گرفته است. با وجود قابلیت های متنوع، این نرم افزار فاقد بسیاری از روابط تخصصی مورد نیاز در حوزه فرآوری مواد معدنی است؛ کمبودی که باعث شده بسیاری از مهندسان ناچار به صرف زمان زیاد برای فرمول نویسی های پیچیده و ترکیب توابع عمومی شوند. این فرایند نه تنها مستعد بروز خطاهای محاسباتی و اشتباهات ناشی از تبدیل واحدها و برداشت نادرست از روابط است، بلکه موجب کاهش دقت و کارایی در انجام محاسبات تخصصی می شود. از این رو، توسعه ابزاری که بتواند روابط استاندارد و صحیح فرآوری مواد معدنی را به صورت توابع آماده و قابل اطمینان در اختیار کاربران قرار دهد، ضرورتی محسوس در حوزه مهندسی معدن و صنایع وابسته به شمار می رود. در این پژوهش، در پاسخ به این نیاز، یک افزونه تخصصی برای نرم افزار صفحه گسترده اکسل طراحی شده که در حال حاضر بیش از ۵۰ رابطه کلیدی فرآوری مواد معدنی را در قالب توابع آماده ارائه می دهد. مراحل انجام کار شامل استخراج و ارزیابی دقیق روابط از منابع معتبر، پیاده سازی این روابط با زبان برنامه نویسی C# و تدوین راهنمای کاربری و انتشار افزونه در پلتفرم GitHub بود. نتیجه این فعالیت، افزونه ای است که پس از نصب، یک بخش اختصاصی به توابع اکسل به نام Mineral Processing اضافه کرده و امکان استفاده ساده و سریع از روابط تخصصی فرآوری مواد معدنی را فراهم می سازد. این افزونه، با تسهیل دسترسی به روابط معتبر و کاهش احتمال خطا، گامی مؤثر در ارتقای دقت، سرعت و اطمینان محاسبات فرآوری مواد معدنی فراهم کرده است.

کلمات کلیدی

مایکروسافت اکسل، فرآوری مواد معدنی، افزونه تخصصی، توابع اکسل، برنامه نویسی

*عهده دار مکاتبات: m.maleki@vru.ac.ir

DOI: 10.22034/anm.2025.23599.1694

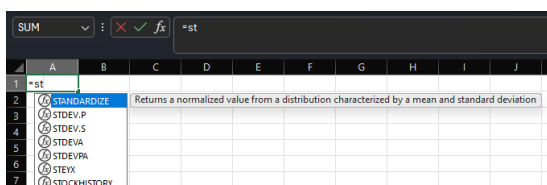
۱- مقدمه

کوواریانس، همبستگی و آزمون‌های فرض آماری را فراهم کرده است [۳، ۵]. اکسل در قالب نسخه‌های مختلفی از جمله نسخه‌های دائمی مانند (Office 2024) و نسخه‌های اشتراکی مبتنی بر فضای ابری مانند (Microsoft 365) عرضه شده است. این نرم‌افزار در بیش از ۱۰۰ زبان در دسترس است و طبق آمارهای منتشرشده، بیش از یک میلیارد نسخه از آن در سراسر جهان نصب شده است. اکسل سهم قابل توجهی از درآمد مایکروسافت را به خود اختصاص داده و در بسیاری از سازمان‌ها، دانشگاه‌ها و مؤسسات مالی به‌عنوان ابزار استاندارد تحلیل داده شناخته می‌شود [۶-۹].

باوجود رقاباتی مانند Google Sheets، LibreOffice، Calc و WPS Office، اکسل به‌دلیل امکانات گسترده، پایداری بالا، یکپارچگی با سایر محصولات مایکروسافت مانند Power BI، SharePoint و Teams، با جامعه کاربری وسیع همچنان در صدر انتخاب کاربران حرفه‌ای قرار دارد. درمجموع Microsoft Excel نه‌تنها یک نرم‌افزار صفحه گسترده، بلکه بستری جامع برای تحلیل، تصمیم‌گیری و مدل‌سازی در حوزه‌های مختلف علمی است [۱۰، ۱۱].

۱-۱- توابع پیش‌فرض موجود در اکسل

در نرم‌افزار Microsoft Excel، توابع بسته به موضوع، دسته‌بندی شده‌اند تا کاربران بتوانند به‌راحتی به توابع موردنیاز خود دسترسی داشته باشند. هر دسته شامل مجموعه‌ای از توابع مرتبط با آن حوزه است. در نرم‌افزار اکسل، دسترسی به این توابع بسیار ساده و منعطف طراحی شده تا کاربران با هر سطحی از مهارت بتوانند از آن‌ها بهره‌مند شوند. یکی از رایج‌ترین روش‌ها، استفاده از نوار فرمول^۱ است؛ برای این کار لازم است روی یک سلول اکسل کلیک کرده و علامت مساوی (=) تایپ و نام تابع موردنظر وارد شود. اکسل به‌صورت خودکار لیستی از توابع پیشنهادی را نمایش می‌دهد که می‌توان آن را انتخاب کرد (شکل ۱).



شکل ۱: روش اول استفاده از توابع اکسل با کارکتر "="

روش دیگر، استفاده از سربرگ Formulas در نوار ابزار بالای صفحه است. در این بخش، توابع به‌صورت

ارزیابی عملکرد و بررسی فنی فرایندها در صنایع معدنی و به‌ویژه در واحدهای فرآوری مواد معدنی بر اساس به‌کارگیری فرمول‌ها و روابط گاهی پیچیده و طولانی است. در این روش علاوه بر احتمال بروز اشتباه و خطا در مراحل انجام محاسبات، اتلاف زمان نیز وجود دارد. در بعضی مواقع نیز رسیدن به نتیجه نهایی مسئله مستلزم چندین مرحله طولانی و غریب‌پوسته در محاسبات بوده و نیازمند انجام حجم زیادی فرمول‌نویسی در نرم‌افزارهایی مانند اکسل است. از طرفی انجام این کار نیازمند این است که دقیق‌ترین رابطه از منابع معتبر استخراج و مطالعه شود. گاهی در بیان یک رابطه تفاوت‌هایی در کتب و مقالات وجود داشته و تشخیص رابطه صحیح بین آنان نیازمند هوشمندی و تسلط کامل بر موضوع است؛ بنابراین، وجود این مشکلات هرچند به‌ظاهر کوچک، سد راه بسیاری از مهندسان در استفاده و به‌کارگیری بخش زیادی از روابط موردنیاز و روزمره شده است.

نرم‌افزار Microsoft Excel یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین ابزارهای صفحه گسترده در جهان است که توسط شرکت مایکروسافت توسعه یافته و نخستین بار در سال ۱۹۸۵ برای سیستم‌عامل مکینتاش و سپس در سال ۱۹۸۷ برای ویندوز عرضه شد. این نرم‌افزار به‌سرعت توانست جایگاه خود را در میان کاربران حرفه‌ای، دانشگاهیان، تحلیل‌گران و مدیران تثبیت کند و امروزه به‌عنوان یکی از اجزای اصلی مجموعه Microsoft Office شناخته می‌شود [۱، ۲].

اکسل با قابلیت‌های گسترده‌ای که در زمینه مدیریت داده، محاسبات عددی، تحلیل آماری، مدل‌سازی مالی و مصورسازی اطلاعات ارائه می‌دهد، به ابزاری حیاتی در حوزه‌های مختلف علمی و صنعتی تبدیل شده است. این نرم‌افزار با پشتیبانی از صدها تابع ریاضی، آماری، منطقی و مالی، امکان انجام محاسبات پیچیده را فراهم می‌سازد. همچنین با بهره‌گیری از زبان برنامه‌نویسی VBA (Visual Basic for Applications)، کاربران می‌توانند فرآیندهای تکراری را خودکارسازی کرده و ابزارهای سفارشی برای تحلیل داده طراحی کنند [۳-۵].

اکسل در مهندسی، برای طراحی مدل‌های عددی، تحلیل حساسیت، شبیه‌سازی‌های ساده و محاسبات فنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین برای تحلیل داده‌های تجربی و آزمایشگاهی، توابعی مانند میانگین، انحراف معیار،

MEDIAN: میانه
AVERAGE: میانگین
COUNT: شمارش سلول‌های عددی
CORREL: ضریب همبستگی
STDEV: انحراف معیار

- توابع منطقی (Logical): برای تصمیم‌گیری و ارزیابی شرایط به کار می‌روند. به عنوان نمونه:

AND: بررسی صحت چند شرط
IF: بررسی شرط
OR: بررسی صحت حداقل یکی
NOT: معکوس کردن نتیجه شرط

- توابع مالی (Financial): برای محاسبات مالی و اقتصادی طراحی شده‌اند. به عنوان نمونه:

NPV: ارزش فعلی خالص
PMT: محاسبه مبلغ قسط وام
RATE: نرخ بهره دوره‌ای
FV: ارزش آینده سرمایه‌گذاری
IRR: نرخ بازده داخلی

- توابع مهندسی (Engineering): در نسخه‌های خاص اکسل برای محاسبات مهندسی و علمی عرضه شده‌اند. به عنوان نمونه:

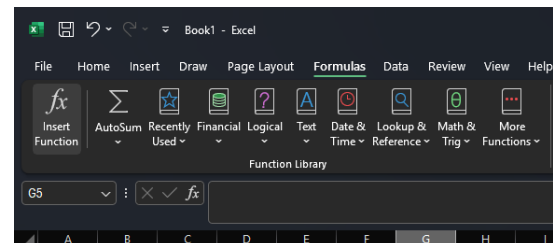
COMPLEX: ساخت عدد مختلط
CONVERT: تبدیل واحدها
IMSUM: جمع اعداد مختلط

ساختاردهی، پیاده‌سازی و دسته‌بندی توابع در اکسل عمدتاً توسط تیم توسعه‌دهنده‌ی مایکروسافت انجام شده است، اما در طراحی بسیاری از این توابع از مفاهیم علمی، آماری، مالی و مهندسی برگرفته‌شده از نتایج کار دانشمندان، پژوهشگران و نظریه‌پردازان مختلف بوده است.

اگرچه در ظاهر اکسل توابعی را در قالب توابع مهندسی یا آماری به صورت پیش‌فرض ارائه کرده است، اما توابع ارائه‌شده بیشتر جنبه عمومی داشته و روابط تخصصی رشته‌های مهندسی در آن گنجانده نشده است. به طور مثال در اکسل توابعی برای به دست آوردن حد جدایش، توزیع دانه‌بندی، محاسبه باردرگردش آسیا، محاسبه اندازه گلوله موردنیاز آسیا، محاسبه حداقل مقدار نمونه‌گیری و ده‌ها توابع موردنیاز محاسبات روزانه در مهندسی معدن و فرآوری مواد معدنی وجود ندارد.

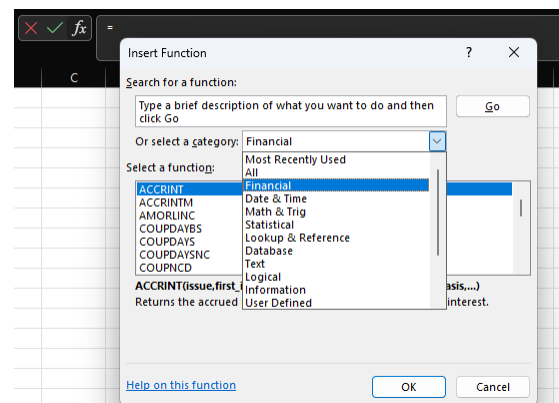
بنابراین این توابع باید توسط تیم‌های تخصصی هر رشته با ترکیب توابع پیش‌فرض اکسل نوشته شود. اگر در نرم‌افزار اکسل روابط تخصصی همه رشته‌های مهندسی، پزشکی و غیره گنجانده شود، حجم نرم‌افزار بیش‌از حد بالا رفته و استفاده از آن برای بسیاری از کاربران دشوار می‌کند. از طرف دیگر اضافه کردن همه روابط سبب می‌شود که گاهی یافتن توابع از میان مثلاً ۱۰ هزار تابع کاری دشوار بوده و در بعضی

دسته‌بندی‌شده قرار دارند؛ از جمله دسته‌های ریاضی، منطقی، متنی، تاریخ و زمان، مالی و غیره. با کلیک روی هر دسته، لیستی از توابع مرتبط ظاهر می‌شود و با انتخاب هر تابع، پنجره‌ای باز می‌شود که به کاربر کمک می‌کند آرگومان‌های لازم را وارد کند. این روش برای کسانی که با ساختار توابع آشنایی ندارند بسیار کاربردی است (شکل ۲).



شکل ۲: روش دوم استفاده از توابع اکسل با استفاده از سربرگ Formulas

روش سوم استفاده از دکمه (fx) کنار نوار فرمول است. این گزینه پنجره‌ای به نام Insert Function را باز می‌کند که در آن می‌توان دسته‌بندی توابع و تابع موردنظر را جستجو کرده یا از دسته‌بندی‌ها انتخاب کرد. این قابلیت برای زمانی مفید است که کاربر نام دقیق تابع را نمی‌داند (شکل ۳).



شکل ۳: روش سوم استفاده از توابع اکسل با استفاده از دکمه fx

در ادامه، مهم‌ترین دسته‌های توابع پیش‌فرض اکسل معرفی شده‌اند:

- توابع ریاضی و مثلثات (Math & Trigonometry): این دسته شامل توابع محاسبات عددی، مثلثاتی و جبری است. به عنوان نمونه:

توان عدد: POWER
جمع مقادیر یک محدوده: SUM
گرد کردن عدد: ROUND
قدر مطلق عدد: ABS
توابع مثلثاتی: SIN, COS, TAN

- توابع آماری (Statistical): برای تحلیل داده‌های عددی و آماری استفاده می‌شوند. به عنوان نمونه:

که دقیق‌ترین رابطه از منابع معتبر استخراج و مطالعه شود. گاهی در بیان یک رابطه تفاوت‌هایی در کتب و مقالات وجود دارد. تشخیص رابطه صحیح بین آنان نیازمندی هوشمندی و تسلط کامل بر موضوع است. گاهی نیاز است واحد همه پارامترهای ورودی یکی تابع به‌دقت موردبررسی قرار گیرد؛ زیرا بعضی از روابط در مهندسی معدن و فرآوری مواد معدنی، بر اساس سیستم متریک^۳ و برخی دیگر بر اساس سیستم امپریال^۴ هستند. گاهی این تبدیل واحدها و عدم توجه به سیستم اندازه‌گیری‌ها، منبع اصلی بروز خطاهای محاسباتی هستند. به‌طور خلاصه در انجام محاسبات فرآوری مواد معدنی می‌تواند اشتباهاتی رخ دهد که ناشی از عوامل زیر می‌تواند باشد:

- وجود تناقضات در روابط ارائه‌شده در منابع مختلف
- عدم دقت در فرمول‌نویسی در اکسل
- عدم توجه به واحد متغیرهای ورودی و عدم توجه به تبدیل واحدها

در بعضی مواقع نیز رسیدن به نتیجه نهایی مسئله مستلزم چندین مرحله طولانی و غیرپیوسته در محاسبات بوده و نیازمند انجام حجم زیادی فرمول‌نویسی در اکسل است. به‌عنوان مثال در شکل ۵، حجم محاسبات لازم برای مدل‌سازی جدایش در هیدروسیکلون نشان داده شده است. این حجم از محاسبات سبب می‌شود که در صورت بروز اشتباه، پیدا کردن ریشه اشتباه محاسبات کاری بسیار زمان‌بر و خسته‌کننده باشد. (هدف از درج شکل ۵ صرفاً نشان دادن حجم محاسبات است، به همین دلیل متن‌های موجود در شکل ناخوانا و بسیار ریز هستند).

تجربه بیش از دو دهه‌ای نویسندگان این مقاله در دانشگاه و صنعت نشان داده، وجود این مشکلات هرچند به‌ظاهر کوچک، سد راه بسیاری از مهندسان در استفاده و به‌کارگیری بخش زیادی از روابط موردنیاز و روزمره فرآوری مواد معدنی شده است. گاهی نیز بسیاری مهندسان باوجود به‌کارگیری صحیح روابط، همواره به نتایج به‌دست‌آمده شک و تردید داشته و مجبورند بارها به مراجع و یا فرمول‌هایی که نوشته‌اند مراجعه کنند و صحت آنان را چندین و چند بار بررسی کنند.

موارد کاربران را به‌اشتباه بیاندازد؛ بنابراین انتظار نمی‌رود که شرکت مایکروسافت حتی در آینده چنین اقدامی را در اکسل انجام دهد؛ اما مایکروسافت با فراهم کردن امکان افزودن افزونه‌های متعدد در نرم‌افزار اکسل، زمینه‌ای را مهیا کرده تا گروه‌های تخصصی مختلف بتوانند بسته به نیاز خود امکاناتی را مازاد بر امکانات پیش‌فرض به اکسل و سایر نرم‌افزارهای آفیس اضافه کنند.

۲-۱- ضرورت انجام تحقیق

همان‌طور که گفته شد، برای استفاده از اکسل در فرآوری مواد معدنی باید فرمول‌ها و روابط موردنیاز با ترکیب توابع پیش‌فرض ایجاد کرد. این روش در بسیار مواقع کاری بسیار زمان‌بر بوده و احتمال بروز اشتباه و خطا در مراحل فرمول‌نویسی وجود دارد. به‌عنوان مثال برای محاسبه حد جدایش تصحیح‌شده (d_{50c}) در هیدروسیکلون با استفاده از مدل پلیت^۲ رابطه (۱) باید این تابع به‌صورت رابطه (۲) در اکسل فرمول‌نویسی شود (شکل ۴).

$$d_{50c} = F_1 \frac{39.7 D_c^{0.46} D_i^{0.6} D_0^{1.21} \eta^{0.5} e^{0.063 \theta}}{D_u^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} \left[\frac{\rho_s - 1}{1.6} \right]^k} \quad (1)$$

$$B11 = (39.7 * B2^{0.46} * B3^{0.6} * B4^{1.21} * B8^{0.5} * EXP(0.063 * B9)) / (B5^{0.71} * B6^{0.38} * B10^{0.45} * ((B7 - 1) / 1.6)^{0.5}) \quad (2)$$

	A	B	C	D
1	Parameter of cyclone			
2	Dc(cm)	50.80		
3	Di(cm)	15.24		
4	Do(cm)	16.00		
5	Du(cm)	11.50		
6	h(cm)	150.00		
7	ps(g/cm3)	2.80		
8	Eta	1.00		
9	f (%)	22.38		
10	Q(lit/min) each cyclon	3155.00		
11	d50(mm)	0.5)		

شکل ۴: فرمول نویسی تابع d_{50c} پلیت در اکسل

بدیهی است که مهندسان ممکن است در تبدیل روابط به فرمول در اکسل دچار اشتباه سهوی شوند. نکته مهم‌تر این است که قبل از فرمول‌نویسی در اکسل نیازمند این است

شکل ۵: حجم محاسبات برای مدل‌سازی هیدروسیکلون در اکسل به روش فرمول نویسی

سرنده و ... وجود دارد. هرچند این مشکلات و تبدیل واحدها به‌ظاهر ساده هستند اما انجام همین تبدیلات زمان‌بر بوده و سبب بروز اشتباهاتی در محاسبات می‌شوند.

لذا نوآوری اصلی در این پژوهش مجتمع شدن بخش محاسبات تخصصی فرآوری با نرم‌افزار اکسل است. این کار سادگی استفاده، سرعت بیشتر و پایداری بیشتر را به همراه دارد. مورد دیگری که سبب شد نویسندگان مقاله به ایجاد چنین افزونه‌ای ترغیب شوند، بحث پیوستگی و خودکارسازی محاسبات بود. به‌عنوان مثال گاهی پیش می‌آید که برای مدل‌سازی یک مدار خردایش که داده‌های آزمایشی (آزمایش‌های اندازه‌گیری زمان ماند، تست‌های تابع شکست و انتخاب و ...) همه در اکسل ذخیره شده‌اند، باید چند مرحله غیرپیوسته انجام شود.

اول نتایج خام آزمایش‌ها به یک نرم‌افزار ثانویه منتقل شود. نرم‌افزارها نیز متعدد هستند، مثلاً نرم‌افزار تعیین زمان ماند، نرم‌افزار تعیین تابع شکست و انتخاب و نرم‌افزار موازنه جرم و ... سپس نتایجی که هرکدام از این نرم‌افزارها ارائه می‌کنند مجدداً به‌صورت متنی به اکسل برگردانده می‌شود. در این حالت، در اکسل ارتباط مستقیمی بین نتایج آزمایش‌ها و نتایج نرم‌افزارها وجود ندارد و همه آنان به‌صورت متن هستند. به‌عبارت دیگر تغییر در داده‌های آزمایش‌ها سبب تغییر بلافاصله نتایج در اکسل نمی‌شود.

در چنین شرایطی اگر لازم باشد در داده‌های آزمایش‌ها تغییری ایجاد شود، این تغییرات مستقیماً منجر به تغییر نتیجه نهایی نمی‌شود؛ به‌عبارت دیگر محاسبات پیوسته نبوده

نویسندگان این مقاله جهت رفع مشکلات ذکرشده، اقدام به ایجاد یک افزونه برای نرم‌افزار اکسل که شامل مهم‌ترین روابط فرآوری معدنی بوده است، کرده‌اند. این کار پژوهشی در سه مرحله انجام شد. مرحله اول، مطالعه و تحقیق به‌منظور جمع‌آوری روابط صحیح فرآوری مواد معدنی از مراجع معتبر بود. مرحله دوم، برنامه‌نویسی این روابط در زبان برنامه‌نویسی C# و ایجاد یک افزونه برای اضافه شدن در نرم‌افزار اکسل با رعایت کلیه اصول و قواعد این نرم‌افزار بود. درنهایت پس از آماده شدن این افزونه، در مرحله سوم، راهنمای استفاده از آن ایجاد گردید.

مهم‌ترین نوآوری این افزونه، ایجاد یک ساختار جدید و پایدار جهت افزودن روابط فرآوری مواد معدنی در نرم‌افزار مایکروسافت اکسل است. در کارهای روزمره در دانشگاه و صنعت، از اکسل هم به‌عنوان یک پایگاه برای ذخیره داده‌ها و هم برای انجام محاسبات استفاده می‌شود. هرچند گاهی برای استفاده از بسیاری از روابط می‌توان از نرم‌افزارهای تجاری شناخته‌شده نیز استفاده کرد؛ اما استفاده از آن نرم‌افزارها علاوه بر اینکه به اشتراک یا نسخه قفل شکسته نیاز دارد، در هر بار استفاده باید داده‌ها به‌صورت دستی از اکسل به این نرم‌افزارها انتقال یابد و پس از انجام محاسبات، نتایج حاصله برای ذخیره‌سازی و یا انجام مراحل بعدی محاسبات، به اکسل برگردانده شود. تجربه نشان داده گاهی در هر انتقال داده بین نرم‌افزارهای مختلف مشکلاتی مانند جابه‌جا شدن ممیزها یا تبدیل استانداردهای مختلف مثل تبدیل مش به میکرون، تبدیل تجمعی عبوری به مانده روی

و نتایج به صورت خودکار به دست نمی‌آید و برای هر بار تغییر در داده‌های ورودی مراجعه به نرم‌افزارهای کمکی امری الزامی خواهد بود. با این اقدام همه روابط و محاسبات مربوط به فرآوری مواد معدنی به صورت یکپارچه در اکسل انجام می‌شود و زمینه استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و بهینه‌سازی نظیر الگوریتم ژنتیک را فراهم می‌شود.

۲- روش انجام تحقیق

این تحقیق در سه مرحله انجام شد که شامل استخراج روابط پرکاربرد، برنامه‌نویسی و ایجاد راهنمای کاربران بود.

۲-۱- مرحله اول: استخراج روابط صحیح فرآوری مواد معدنی

در مرحله اول معتبرترین مراجع فرآوری مواد معدنی به صورت دقیق بررسی و فهرستی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روابط فرآوری مواد معدنی تهیه گردید [۱۲-۱۴]. در این مرحله گاهی روابطی وجود داشتند که در منابع معتبر، دارای تفاوت‌هایی بودند. تشخیص رابطه صحیح بین روابط ارائه شده یکی از بخش‌هایی مهم و زمان‌بر این پژوهش بود. بخش دیگری که در این مرحله انجام شد، تبدیل همه متغیرهای ورودی این روابط بر اساس سیستم یکای اندازه‌گیری بین‌المللی (SI) بود. هرچند تعداد زیادی از روابط به صورت پیش‌فرض برحسب واحدهای متریک بودند ولی برای ایجاد یکنواختی، روابطی که برحسب واحدهای امپریال بودند به متریک تبدیل شدند.

در اولین نسخه منتشرشده این افزونه سعی بر این بود که ابتدا روابط پرکاربرد فرآوری مواد معدنی به این مجموعه اضافه شود. در این راستا به تجربه فعالیت‌های صنعتی و آموزشی مراجعه گردید. با توجه به تجربه‌ای که نویسندگان در سال‌های اخیر در بحث آموزش و پژوهش داشتند، روابطی که در این سالیان به طور روزمره در صنعتی و دانشگاه مورد استفاده قرار می‌گرفت، در اولویت اضافه کردن و کد نویسی قرار گرفت. به عبارت دیگر هدف اولیه این بود که به پرتکرارترین سؤالات این چندساله پاسخ داده شود. بخشی از این سؤالات به شکل زیر بود:

- D50 یا D80 چند است و چطور محاسبه کنم؟
- بار در گردش را چطور محاسبه کنم؟
- کارایی جدایش را چطور حساب کنم؟

- دانسیته پالپ را چطور به درصد جامد تبدیل کنم و برعکس؟
- چقدر نمونه بگیرم؟ برای دانه‌بندی چقدر و برای عیار سنجی چقدر؟
- پرشدگی آسیا چقدر است؟ آسیای دارای سر مخروطی با سر صاف چطور؟
- سرعت آسیا بر حسب RPM را چطور به درصد تبدیل کنم و بالعکس؟
- ۴۰۰ مش (سایر مش‌ها) چند میکرون است؟
- اندیس باند را چطور حساب کنم؟
- و ...

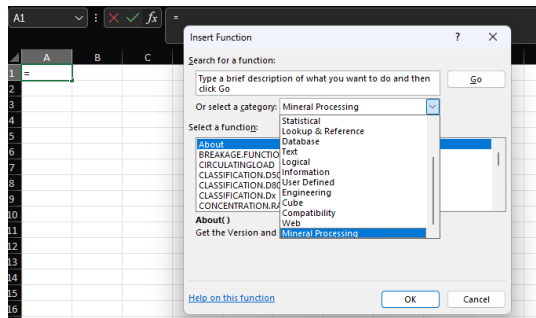
لذا در اولین نسخه منتشرشده، توابعی در اولویت بود که بخش عمده‌ای از سؤالات روزمره را پاسخ دهد. در اولین نسخه منتشرشده، این افزونه شامل حدوداً ۵۰ تابع تخصصی فرآوری است. سایر توابع در به‌روزرسانی‌های بعدی به افزونه اضافه می‌شود. این به‌روزرسانی‌ها نیز در نرم‌افزار اکسل به کاربر اطلاع داده می‌شود.

۲-۲- مرحله دوم: برنامه‌نویسی افزونه

مرحله دوم این پژوهش، برنامه‌نویسی و ایجاد افزونه‌ای برای اضافه کردن این روابط به نرم‌افزار مایکروسافت اکسل بود. همه نسخه‌های اکسل یک محیط برنامه‌نویسی ساده به نام VBA^۵ برای توسعه‌دهندگان ارائه کرده است. یکی از موارد استفاده VBA، ایجاد فرمول‌های دلخواه^۶ برای اکسل است؛ اما VBA برای توسعه روابط ساده و با بار محاسباتی کم کاربرد دارد. همچنین VBA محدودیت زیادی دارد؛ لذا امکان تعریف روابط پیچیده و یا روابطی که نیاز به الگوریتم‌های ویژه یا کتابخانه‌های جانبی دارد، وجود ندارد. هرچند که ابتدا برنامه‌نویسی این افزونه در VBA انجام شد ولی در نهایت کد نویسی در VBA متوقف و در زبان برنامه‌نویسی C# این کار انجام و به پایان رسید.

۲-۳- مرحله سوم: ایجاد راهنمای کاربران برای افزونه

مهم‌ترین بخش یک نرم‌افزار تخصصی، ارائه راهکاری برای راهنمایی کاربران است. لذا در مرحله سوم توسعه این افزونه، راهنمای این افزونه به جهت همخوانی بهتر با نرم‌افزار اکسل به زبان انگلیسی ایجاد شد. سپس برای راحتی دسترسی کاربران زمینه‌ای فراهم گردید که این افزونه و راهنمای آن در پلتفرم GitHub منتشر شود.



شکل ۶: نمای بخش Insert Function پس از نصب صحیح افزونه Mineral processing

اضافه شدن این بخش به این معناست که همه روابط فرآوری تدوین شده به نرم افزار اکسل کاربر اضافه شده است. توابعی که تاکنون در این افزونه اضافه شده است در جدول ۱ آمده است. خروجی و نتیجه برخی از روابط به صورت تک عدد و برخی دیگر به صورت ستونی از نتایج است. به عنوان مثال تابع PARTICLE.SIZE.DISTRIBUTION تابعی است که مانده روی سرندها را به صورت ستونی از کاربر گرفته و نتیجه نهایی آن را به صورت ستونی از تجمعی عبوری برمی گرداند. یکی از ویژگی هایی این افزونه که استفاده از آن را برای مهندسان ساده می کند وجود راهنمای گام به گام استفاده از هر رابطه است. به عنوان مثال اگر کاربر بخواهد میزان درصد سرعت آسیا را محاسبه کند، ابتدا تابع MILLSPEED.PERCENT را از لیست توابع انتخاب می کند.

پلتفرم GitHub بزرگترین انجمن توسعه دهندگان نرم افزار در جهان و یکی از محبوب ترین بسترهای توسعه نرم افزار در جهان است. GitHub به توسعه دهندگان اجازه می دهد کدهای خود را مدیریت و اشتراک گذاری کنند. این پلتفرم بر پایه سیستم کنترل نسخه Git ساخته شده و امکاناتی مانند مخازن^۷، شاخه ها^۸ و پیگیری مشکلات^۹ را در اختیار کاربران قرار می دهد. در سال ۲۰۱۸، شرکت مایکروسافت GitHub را با مبلغ حدود ۷/۵ میلیارد دلار خریداری کرد. از آن زمان، GitHub به عنوان یکی از زیرمجموعه های مایکروسافت فعالیت کرده و همکاری های گسترده ای با سایر محصولات این شرکت دارد [۱۵].

۳- نتایج

پس از اتمام مراحل سه گانه، نتیجه کار شامل یک فایل Mineral Processing Add-in.xll برای ویندوزهای ۳۲ و ۶۴ بیت و یک راهنمای کاربران بود. دریافت فایل های افزونه و راهنمای آن در پلتفرم GitHub به آدرس اینترنتی زیر درج شد:

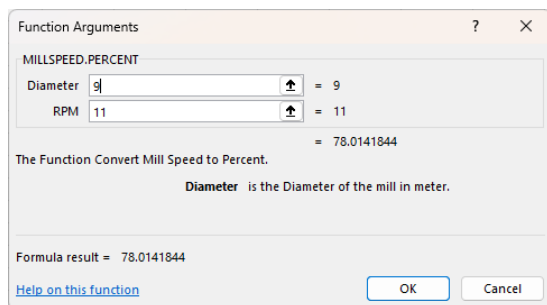
<https://github.com/Dr-Alireza-Ghasemi/mineral-processing-functions>

در این آدرس، راهنمای دانلود، نصب و به کارگیری این افزونه به طور کامل شرح داده شد. اگر نصب افزونه و پیش نیازهای آن به درستی انجام شده باشد، در بخش Insert Function اکسل در قسمت Category یک بخش جدید به نام Mineral Processing اضافه می شود (شکل ۶).

جدول ۱: توابع موجود در اولین نسخه منتشر شده افزونه Mineral Processing

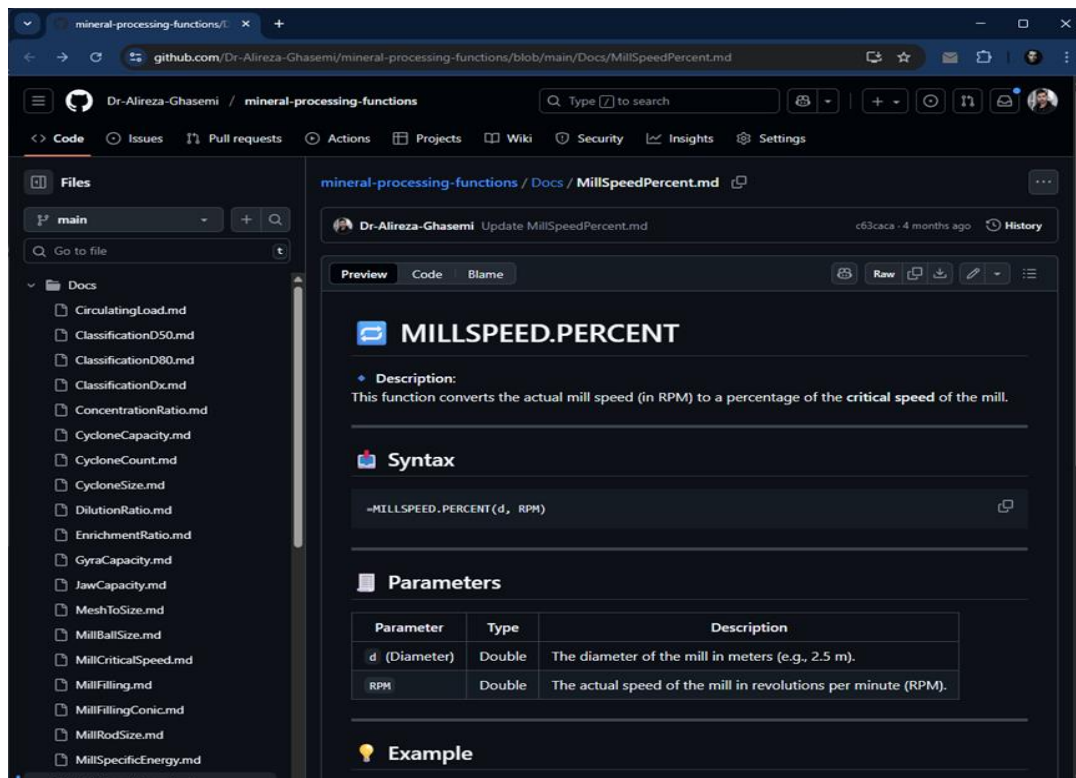
نام تابع	شرح
CIRCULATINGLOAD	محاسبه بار در گردش
CLASSIFICATION.D50	محاسبه D50 از روی دانه بندی
CLASSIFICATION.D80	محاسبه D80 از روی دانه بندی
CLASSIFICATION.Dx	محاسبه اندازه ای که x درصد از مواد از آن عبور می کنند (x عدد دلخواه است)
CONCENTRATION.RATIO	محاسبه نسبت پرعیار شوندگی
CYCLONE.CAPACITY	محاسبه ظرفیت سیکلون
CYCLONE.COUNT	محاسبه تعداد سیکلون مورد نیاز برای مدار خردایش
CYCLONE.SIZE	محاسبه اندازه سیکلون مورد نیاز برای مدار خردایش
DILUTION.RATIO	محاسبه نسبت رقت
ENRICHMENT.RATIO	محاسبه نسبت غنی شدگی
GYRATORY.CRUSHER.CAPACITY	محاسبه ظرفیت سنگ شکن ژیراتوری
JAW.CRUSHER.CAPACITY	محاسبه ظرفیت سنگ شکن فکی
MESH.TO.SIZE	تبدیل شماره مش به اندازه بر حسب میکرون
MILL.BALL.SIZE	محاسبه اندازه گلوله مورد نیاز برای آسیای گلوله ای

MILL.CRITICAL.SPEED	تعیین سرعت بحرانی آسیا برحسب RPM
MILL.FILLING	تعیین پرشدگی آسیا به روش ساده
MILL.FILLING.CONIC	تعیین پرشدگی آسیا زمانی که سر ورودی-خروجی آسیا به صورت مخروطی است
MILL.ROD.SIZE	تعیین قطر ملیه ها در آسیای میله ای
MILL.SPECIFIC.ENERGY	محاسبه انرژی مخصوص خردایش برحسب کیلووات ساعت بر تن
MILLSPEED.PERCENT	تبدیل سرعت آسیا از RPM به درصد سرعت بحرانی
MILLSPEED.RPM	تبدیل سرعت آسیا از درصد سرعت بحرانی به RPM
MILL.WORK.INDEX.COMPARE	تعیین اندیس کار باند آسیاکنی برای ماده مجهول به روش مقایسه ای
MILL.WORK.INDEX.OPERATING	تعیین اندیس کار باند آسیاکنی به روش عملیاتی بر اساس مصرف انرژی واقعی
PARTICLE.SIZE.DISTRIBUTION	محاسبه درصد تجمعی عبوری (دانه بندی) بر اساس داده های خام آزمایشگاهی
PLITT.D50	محاسبه D50 سیکلون بر اساس رابطه پلیت
PLITT.M	محاسبه M (دقت جدایش) سیکلون بر اساس رابطه پلیت
PLITT.P	محاسبه فشار سیکلون بر اساس رابطه پلیت
PLITT.S	محاسبه نسبت تقسیم (S) سیکلون بر اساس رابطه پلیت
PROPAGATION.OF.ERROR	محاسبه سرایت خطای اندازه گیری از جز اندازه گیری به نتیجه نهایی
PULPDENSITY.TO.MASS.SOLIDPERCENT	تبدیل دانسیته پالپ به درصد جامد وزنی
PULPDENSITY.TO.VOL.SOLIDPERCENT	تبدیل دانسیته پالپ به درصد جامد حجمی
RECOVERY.GRADE	محاسبه بازیابی بر اساس داده های عیاری
RECOVERY.WEIGHT	محاسبه بازیابی بر اساس داده های وزنی
ROSIN.RAMMLER.D63	تعیین D63 رابطه Rosin-Rammler
ROSIN.RAMMLER.DIST	ایجاد دانه بندی بر اساس رابطه Rosin-Rammler بر اساس M و D63
ROSIN.RAMMLER.M	تعیین ثابت M در رابطه Rosin-Rammler
RTD.INV.WELLER	تعیین ثابت های تعیین زمان ماند بر اساس مدل Weller
RTD.WELLER	محاسبه زمان ماند برای انجام شبیه سازی های خردایش و سنتیک فلو تاسیون
SAMPLE.ASSAY	محاسبه حداقل مقدار نمونه لازم برای عیارسنجی
SAMPLE.CLASSIFICATION	محاسبه حداقل مقدار نمونه لازم برای دانه بندی
SEPARATION.EFFICIENCY	محاسبه کارایی جدایش بر اساس داده های عیاری
SEPARATION.EFFICIENCY.M	محاسبه کارایی جدایش بر اساس داده های عیاری و وزن (روش دوم)
SIZE.TO.MESH	تبدیل اندازه به شماره مش های استاندارد
SOLIDPERCENT.TO.DILUTION.RATIO	تبدیل درصد جامد به نسبت رقت
SOLIDPERCENT.MASS.TO.PULPDENSITY	تبدیل درصد جامد وزنی به دانسیته پالپ
SOLIDPERCENT.MASS.TO.VOL	تبدیل درصد جامد وزنی به حجمی
SOLIDPERCENT.VOL.TO.MASS	تبدیل درصد جامد حجمی به وزنی
SOLIDPERCENT.VOL.TO.PULPDENSITY	تبدیل درصد جامد حجمی به وزنی



شکل ۷: وارد کردن متغیرهای توابع در اکسل

سپس پنجره ای به صورت شکل ۷ باز شده و متغیرها را از کاربر درخواست می کند. در قسمت زیرین آن توضیحاتی کلی در مورد این تابع درج شده و با کلیک روی هر متغیر، توضیحاتی تکمیلی در مورد آن متغیر و واحد آن نشان داده می شود. کاربر در صورت نیاز به توضیحات تکمیلی، با کلیک روی متن آبی رنگ پایین پنجره (Help on this Function) به صفحه مربوط به توضیحات این تابع در پلتفرم GitHub منتقل می شود (شکل ۸).



شکل ۸: توضیحات تکمیلی روابط در پلتفرم GitHub

ویژگی به نوعی در این افزونه گنجانده شده که بین روابط پیش فرض اکسل و روابط این افزونه هیچ تفاوتی از نظر امکانات و راهنما وجود نداشته باشد. این افزونه هم اکنون در پلتفرم GitHub در دسترس بوده و به مرور روابطی که صحت آن اثبات شود به آن اضافه می شود. پس از انتشار نسخه جدیدتر، یک پیام برای کاربران ارسال شده و از انتشار نسخه جدید آنان را با خبر می کند.

یکی دیگر از راه های استفاده از این روابط تایپ مستقیم این روابط پس از درج کارکتر (=) در یکی از سلول های اکسل است. در این روش کاربر وقتی چند کارکتر اول یک تابع را تایپ کند، اکسل به صورت هوشمند نام آن تابع را کامل می کند. در این حالت نیز مانند حالت قبل، برای خود تابع و تک تک متغیرهای ورودی آن توضیحاتی ارائه می کند تا کاربر را به صورت دقیق راهنمایی کند (شکل ۹). به عبارت دیگر این

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1		=RECOVERY.GRADE()														
2		RECOVERY.GRADE(Grade of Concentrate, Grade of Tail, Grade of Feed)														
3		The term 'recovery' refers to the percentage of the total mineral present in the ore that is extracted into the concentrate. This function utilizes the grades of the concentrate, tail, and feed.														
4		Grade of Concentrate: is the Grade of Concentrate														
5																

شکل ۹: استفاده از روابط موجود در افزونه به روش شروع یا کارکتر (=).

۴- نتیجه گیری

- برنامه نویسی در زبان C# به منظور اضافه کردن این روابط به صورت تابع در نرم افزار مایکروسافت اکسل
- ایجاد راهنمای استفاده از این افزونه در اکسل برای کاربران

در پایان این افزونه به همراه راهنمای آن در پلتفرم GitHub که متعلق به شرکت مایکروسافت است، بارگذاری گردید.

- یک افزونه برای انجام ساده تر محاسبات فرآوری مواد معدنی برای اکسل ارائه شد. با استفاده از ابزار محاسبات پیچیده و زمان بر تخصصی به صورت خودکار و با دقت زیاد انجام می شود.
- ایجاد این افزونه در سه مرحله انجام گرفت:
- تحقیق و پژوهش به منظور استخراج روابط صحیح فرآوری مواد معدنی از کتب و مقالات مرجع

مراجع

- [8] E. Sean. "Microsoft Excel joins the 1 billion installs club on Android." <https://www.windowscentral.com/excel-joins-1-billion-installs-club-android> (accessed).
- [9] P. Tony. "Microsoft 365 vs. Office 2024: What's the Difference?" <https://www.howtogeek.com/microsoft-365-vs-office-2024-whats-the-difference/> (accessed).
- [10] C. Bianca. "The 11 Best Free Microsoft Excel Alternative Programs in 2025." <https://www.techrepublic.com/article/free-alternatives-to-microsoft-excel/> (accessed).
- [11] K. Vartika. "12 Best Microsoft Excel Alternatives & Competitors for 2025." <https://www.proofhub.com/articles/best-microsoft-excel-alternatives> (accessed).
- [12] B. A. Wills and J. Finch, Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Butterworth-Heinemann, 2015.
- [13] R. P. King, *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. Elsevier Science & Technology Books, 2001.
- [14] "Metallurgist Blog," 2025/10/16. [Online]. Available: <https://www.911metallurgist.com/blog/>
- [15] C. Microsoft, "Microsoft to acquire GitHub for \$7.5 billion," 2018/06/04 2018. [Online]. Available: <https://news.microsoft.com/source/2018/06/04/microsoft-to-acquire-github-for-7-5-billion/>
- [1] G. Corey. "A Brief History of Microsoft Excel." <https://www.nobledesktop.com/classes-near-me/blog/history-of-microsoft-excel> (accessed).
- [2] P. Spreadsheet. "History of Microsoft Excel - With Timeline." <https://spreadsheetplanet.com/excel/history/> (accessed).
- [3] N. Charlie. "Statistics and Data Analysis with Excel, Part 1." <https://www.coursera.org/learn/statistics-and-data-analysis-with-excel-part-1> (accessed).
- [4] S. Prof. "Microsoft Excel for Scientists and Engineers." <https://www.udemy.com/course/microsoft-excel-for-scientists-and-engineers/> (accessed).
- [5] S. Shamima. "From Spreadsheet to Insight: A Complete Data Science Workflow in Excel." <https://www.exceldemy.com/from-spreadsheet-to-insight-a-complete-data-science-workflow-in-excel/> (accessed).
- [6] Q. E. B. H. W. S. L. M. M. L. M. P. Carl M. Rebman Jr, "An Industry Survey of Analytics Spreadsheet Tools Adoption: Microsoft Excel vs Google Sheets," 2023. [Online]. Available: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1409034.pdf>.
- [7] L. Giuliano De. "Master New Excel Translation Features: A Quick Guide." <https://www.hubsite365.com/en-ww/crm-pages/how-to-use-the-new-translation-functions-in-excel-6cdd1383-3f64-48a7-b198-afe230838813.htm> (accessed).

^۱ Formula bar

^۲ Plitt's model

^۳ Metric

^۴ Imperial

^۵ Visual Basic for Applications

^۶ User-Defined Function

^۷ Repositories

^۸ Branches

^۹ Issues