

GemTOF: یک روش انقلابی برای شناسایی اصالت و خاستگاه گوهرها

زهرامختاری^۱، فاطمه تقی زاده^{۲*}

- ۱- استادیار گروه فناوری فرآورده های طبیعی و مواد معدنی، دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه نیشابور
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه فناوری فرآورده های طبیعی و مواد معدنی، دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه نیشابور

چکیده

در دنیای امروز گوهرشناسی، پاسخ به سوالات مهمی مانند این گوهر از کجا آمده؟ اصل است یا تقلبی؟ و آیا بهسازی شیمیایی روی آن انجام شده؟ نیازمند ابزارهای بسیار پیشرفته است. GemTOF، جدیدترین و قدرتمندترین این ابزارهاست. این دستگاه با تاباندن یک پرتو لیزر بسیار باریک به سطح گوهر، در کسری از ثانیه تقریباً تمام عناصر شیمیایی موجود در آن را شناسایی و اندازه گیری می کند، بدون اینکه کوچک ترین آسیبی به زیبایی یا ارزش گوهر وارد کند. در این مقاله، پس از معرفی این فناوری، هفت کاربرد اصلی آن در گوهرشناسی به طور جداگانه شرح داده شده و نشان می دهیم که GemTOF چگونه می تواند برای شناسایی خاستگاه فیروزه های معروف جهان، تشخیص تقلبی بودن و مطالعه علمی رنگ این گوهرسنگ به کار رود.

کلیدواژه ها: گوهرشناسی، دستگاه GemTOF، تشخیص خاستگاه، فیروزه، عناصر شیمیایی

"GemTOF is a revolutionary method for identifying the authenticity and origin of gemstones."

Zahra Mokhtari¹, Fatemeh Taghizadeh¹

1. Department of Natural Products Technology and Mineral Processing, Faculty of New Technologies, University of Nishabur

Abstract

In modern gemology, answering key questions such as "Where is this gem from?", "Is it genuine or fake?", and "Has it been chemically treated?" requires highly advanced tools. GemTOF is the latest and most powerful of these tools. By directing an extremely fine laser beam onto the surface of the gem, this device identifies and measures nearly all chemical elements present within it in a fraction of a second—without causing any damage to the gem's beauty or value. In this article, after introducing this technology, its seven main applications in gemology are separately explained, demonstrating how GemTOF can be used to identify the origin of the world's famous turquoises, detect imitations, and conduct scientific studies on the color of this precious gemstone.

Keywords: Gemology, GemTOF, Origin determination, Turquoise, Chemical elements

۱- مقدمه: گوهرشناسی در عصر فناوری‌های نوین

تشخیص گوهرسنگ‌ها سال‌ها تنها با چشم، ذره‌بین و اندازه‌گیری خواص ساده‌ای مانند چگالی و رنگ انجام می‌شد. اما امروزه با پیشرفت روش‌های ساخت گوهرهای مصنوعی یا تکنیک‌های پیچیده برای تغییر رنگ و پایداری سنگ‌های طبیعی، نیاز به روش‌های علمی دقیق‌تر بیش از پیش احساس می‌شود. تاکنون دستگاه‌هایی مانند میکروسکوپ‌های پیشرفته و دستگاه‌های پرتو ایکس کمک زیادی کرده‌اند، اما یک محدودیت بزرگ دارند: آن‌ها یا نمی‌توانند تمام عناصر موجود در سنگ را به طور همزمان بررسی کنند، یا برای این کار به نمونه‌برداری زیادی نیاز دارند.

اینجاست که GemTOF بازی را تغییر می‌دهد. تصور کنید بتوانید با یک «عکس‌برداری شیمیایی» فوری، تمام مواد تشکیل‌دهنده یک گوهر را ببینید؛ از عناصر اصلی گرفته تا عناصر بسیار نادر که تنها چند اتم از آن‌ها در کل سنگ وجود دارد. این دقیقاً کاری است که GemTOF انجام می‌دهد. این دستگاه ترکیب شیمیایی منحصربه‌فرد هر گوهر را - که مانند «انگشت شیمیایی» آن است - آشکار می‌کند. این اثر انگشت، کلید پاسخ به بسیاری از سوالات مهم در گوهرشناسی است.

۲- GemTOF چیست و چگونه کار می‌کند؟

Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Time-Of-Flight Mass Spectrometry (LA-ICP-TOF-

MS). در واقع یک دستگاه طیف‌سنج جرمی بسیار پیشرفته است که برای تحلیل گوهرها بهینه‌سازی شده است (شکل ۱). کار

آن را می‌توان به سه مرحله ساده تقسیم کرد:

۱- نمونه‌برداری با لیزر (لیزر ابلیشن): یک پرتو لیزر بسیار دقیق و کم‌انرژی، برای چند میلی‌ثانیه روی نقطه‌ای بسیار کوچک از سطح گوهر (معمولاً در قسمت کمربند یا پشت سنگ که دیده نمی‌شود) متمرکز می‌شود. این لیزر به اندازه‌ای ظریف عمل می‌کند که پس از کار، هیچ خراش یا حفره قابل مشاهده‌ای باقی نمی‌گذارد. انرژی لیزر، مقدار بسیار ناچیزی از ماده را از سطح سنگ بلند می‌کند و به ابر ریزدیزی از ذرات تبدیل می‌نماید.

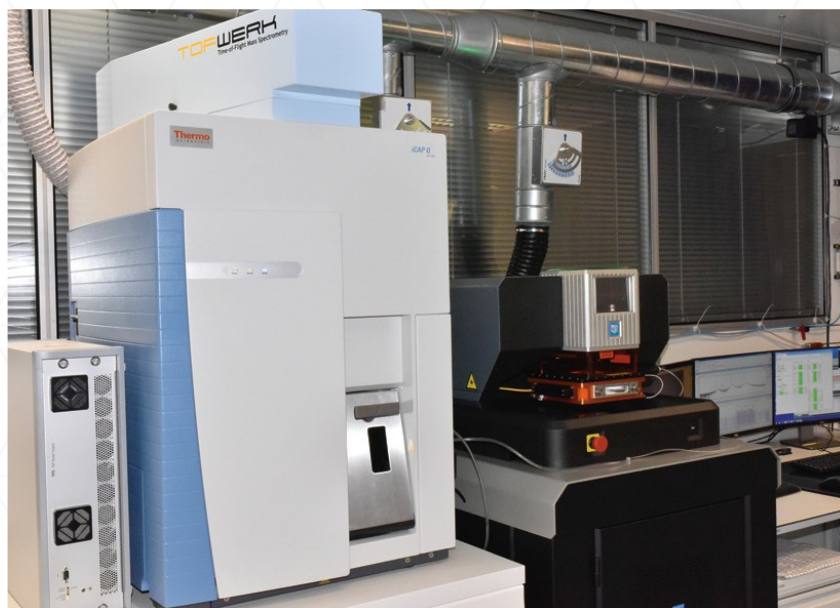
۲- تبدیل نمونه به اتم (پلاسمای داغ): این ابر ذرات ریز به داخل یک مشعل پلازما که دمایی هزاران درجه سانتیگراد دارد، فرستاده می‌شود. در این گرمای شدید، همه ذرات کاملاً تبخیر و به اتم‌های منفرد سازنده خود شکسته می‌شوند.

۳- شمارش و شناسایی اتم‌ها (Time of Flight): اتم‌ها سپس وارد بخش اصلی دستگاه (طیف‌سنج جرمی) می‌شوند. در اینجا، به هر اتم یک بار الکتریکی مثبت داده می‌شود که به آن یون گفته می‌شود. سپس همه یون‌ها با یک ضربه الکتریکی به سوی یک مسیر طولانی (لوله درایفت) پرتاب می‌شوند. یون‌های سبک‌تر سریع‌تر و یون‌های سنگین‌تر کندتر در این مسیر حرکت می‌کنند. یک حسگر در انتهای مسیر، زمان رسیدن هر گروه از یون‌ها را ثبت می‌کند. از آنجایی که می‌دانیم هر عنصر وزن اتمی مشخصی دارد، با اندازه‌گیری این زمان‌ها می‌توانیم دقیقاً بفهمیم هر یونی متعلق به کدام عنصر است (مثلاً آهن، مس، روی) و چند اتم از آن در نمونه وجود دارد. اما چرا GemTOF یک انقلاب است؟

* سرعت باورنکردنی: این کل فرآیند در کمتر از یک ثانیه اتفاق می‌افتد.

* دقت فوق‌العاده: می‌تواند حتی یک اتم از یک عنصر خاص را در میان میلیاردها اتم دیگر تشخیص دهد.

* ثبت همه چیز: برخلاف روش‌های قدیمی، GemTOF در همان یک لحظه، سیگنال همه عناصر موجود را ثبت می‌کند.

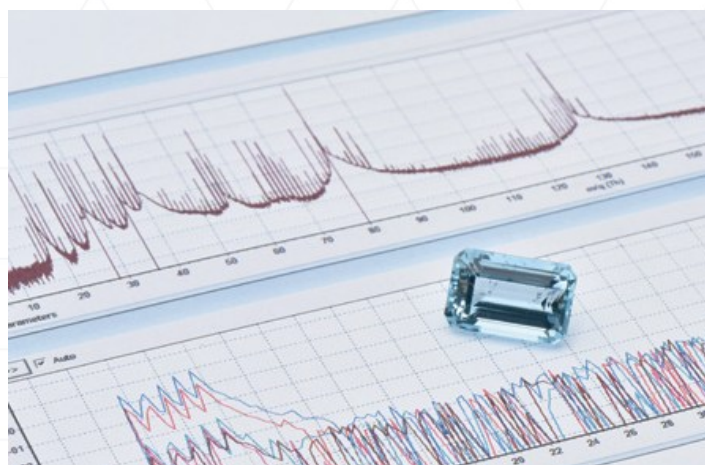


شکل ۱- عکس کامل از دستگاه GemTOF نصب‌شده در آزمایشگاه SSEF

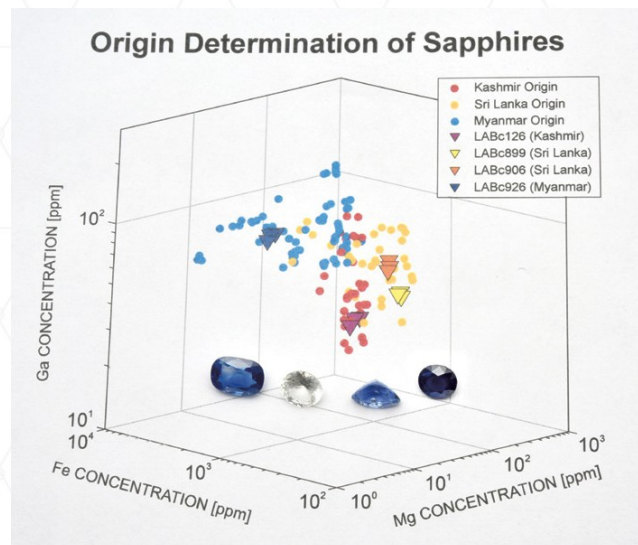
۳- کاربردهای اصلی GemTOF در گوهرشناسی

الف - تعیین خاستگاه جغرافیایی گوهرها

هر معدن گوهرسنگی، به دلیل تفاوت در ترکیب خاک و سنگ‌های مادر، الگوی شیمیایی منحصر به فردی در گوهرهای خود ایجاد می‌کند. GemTOF با مقایسه «اثر انگشت شیمیایی» یک گوهر ناشناخته با بانک اطلاعاتی از هزاران نمونه با خاستگاه معلوم، می‌تواند با احتمال بسیار بالا بگوید که آن گوهر از کدام معدن یا منطقه جغرافیایی آمده است. این برای گوهرهای مشهوری مانند سفیرآبی کشمیر که ارزش بسیار بالاتری دارند، حیاتی است. GemTOF مقادیر عناصری مانند آهن، تیتانیوم و گالیم را اندازه می‌گیرد و با الگوی شناخته‌شده سفیرآبی کشمیر مقایسه می‌کند (شکل ۲ و ۳).



شکل ۲- اسکرین‌شات از طیف جرمی کامل و سیگنال زمان (مثال: آکوامارین)



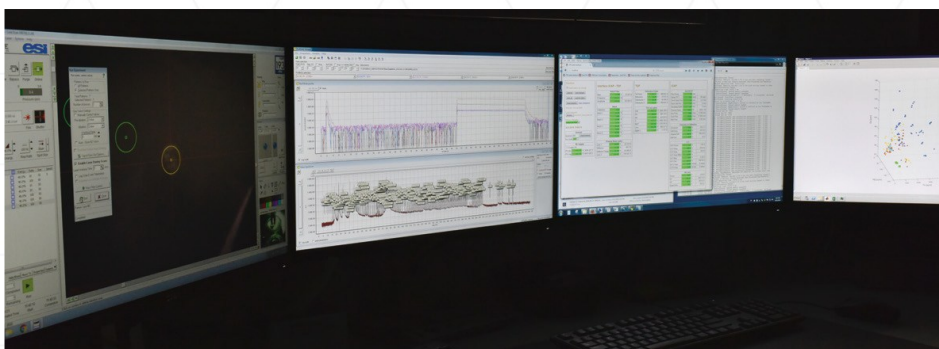
شکل ۳- نمودار سه بعدی پراکندگی عناصر Ga ، Fe ، Mg برای سفایرهای آبی سه منطقه

ب- شناسایی گوهرهای مصنوعی و بدلی

گوهرهای مصنوعی (ساخته شده در آزمایشگاه) و بدلی (مانند شیشه یا سرامیک رنگ شده) دارای ترکیب شیمیایی کاملاً متفاوتی نسبت به نمونه‌های طبیعی هستند. GemTOF به سرعت این تفاوت‌ها را تشخیص می‌دهد. یک زمرد مصنوعی ممکن است فاقد ناخالصی‌های خاص طبیعی باشد یا مقادیر غیرعادی از عناصر رنگ‌دهنده داشته باشد. بدل شیشه‌ای نیز مقدار بسیار بالای سیلیسیم را نشان می‌دهد.

ج- تشخیص بهسازی‌های شیمیایی و فیزیکی

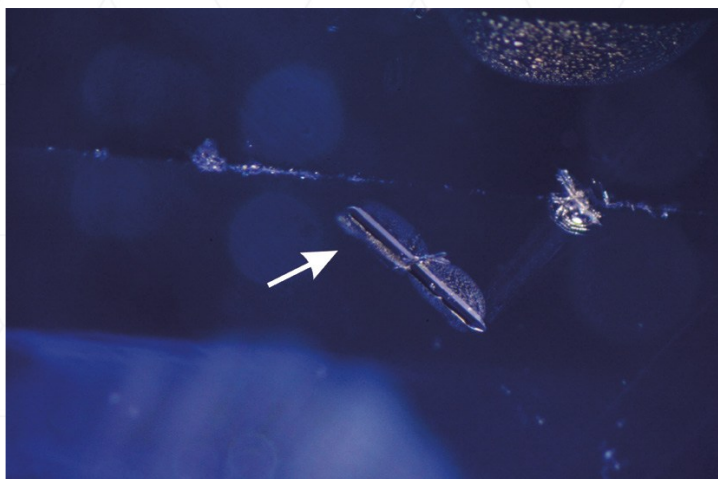
بسیاری از گوهرهای طبیعی برای بهبود رنگ یا شفافیت، تحت بهسازی مانند حرارت‌دهی، پرتودهی یا رنگ‌آمیزی شیمیایی قرار می‌گیرند. GemTOF قادر است کوچکترین اثرات این بهسازی‌ها را کشف کند. در سفایرهای آبی بهسازی شده با بریلیم، GemTOF می‌تواند حتی مقادیر بسیار کم بریلیم (در حد بخش در میلیون) را در سطح سنگ تشخیص دهد که شواهدی قوی بر بهسازی بودن آن است (شکل ۴).



شکل ۴- نمای زمان واقعی از مانیتور سیستم که عناصر غیرمنتظره (ناشی از بهسازی) را نشان می‌دهد

د- تعیین سن گوهرها از طریق ناخالصی‌ها

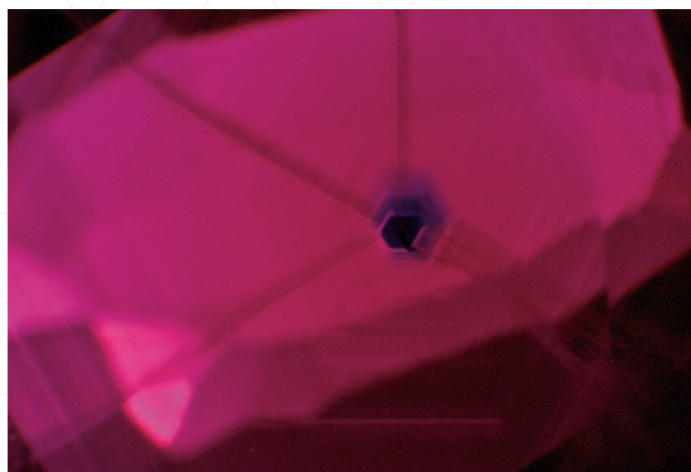
برخی گوهرها حاوی ناخالصی‌های میکروسکوپی مانند کانی زیرکن هستند که مانند ساعت زمین‌شناسی عمل می‌کنند. GemTOF می‌تواند نسبت ایزوتوپ‌های اورانیوم و سرب را در این ناخالصی‌های ریز اندازه‌گیری کرده و سن تشکیل گوهر را تخمین بزند. اندازه‌گیری سن یک سفایر آبی از طریق ناخالصی زیرکن داخل آن، می‌تواند به تعیین خاستگاهش کمک کند، زیرا گوهرهای مناطق مختلف در دوره‌های زمین‌شناسی متفاوتی تشکیل شده‌اند (شکل ۶).



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی از ناخالصی زیرکن درون یک سفایر آبی کشمیری

ن- نقشه‌برداری شیمیایی و مطالعه منطقه‌بندی رنگ

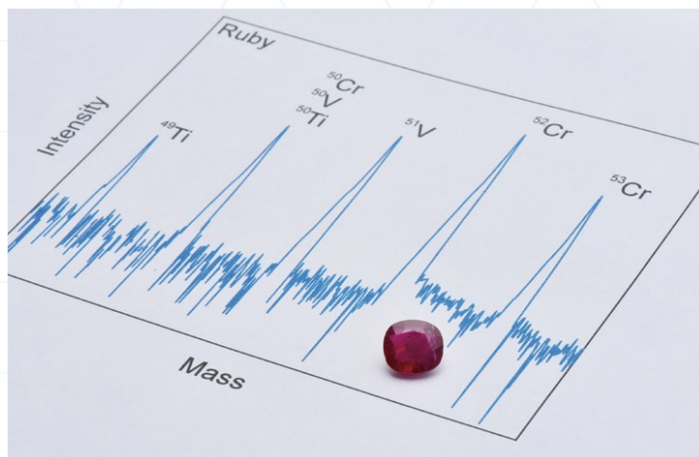
در بسیاری از گوهرها، توزیع عناصر در سطح سنگ یکنواخت نیست و این باعث ایجاد ناحیه‌های رنگی مختلف می‌شود. GemTOF می‌تواند یک نقشه شیمیایی دقیق از سطح گوهر ایجاد کند. در یک توپاز، GemTOF می‌تواند نشان دهد که مناطق آبی رنگ حاوی چه عنصر یا حالتی از آهن هستند که مناطق بی‌رنگ فاقد آنند (شکل ۷).



شکل ۷- تصویری از منطقه‌بندی رنگی یا نقشه‌برداری عنصری دریاقت میانمار

و- تحلیل ایزوتوپی برای مطالعات پیشرفته

ایزوتوپ‌ها اتم‌های یک عنصر با وزن‌های متفاوت هستند. نسبت ایزوتوپ‌ها در گوه‌ها می‌تواند اطلاعاتی درباره منشأ زمین‌شناختی آنها ارائه دهد. GemTOF به دلیل دقت بالا برای این نوع مطالعات ایده‌آل است. نسبت ایزوتوپ‌های اکسیژن در زمرد می‌تواند نشان دهد که آیا سنگ در اعماق زمین تشکیل شده یا در نزدیکی سطح (شکل ۸).



شکل ۸- تحلیل ایزوتوپی دقیق یک یاقوت سرخ با استفاده از GemTOF حضور ایزوتوپ‌های مختلف تیتانیوم، واندیوم و کروم را آشکار می‌سازد.

ه- ایجاد بانک داده‌های مرجع و استانداردسازی

یکی از مهم‌ترین کاربردهای GemTOF، ایجاد بانک اطلاعاتی گسترده از ترکیب شیمیایی گوه‌های با خاستگاه معلوم است. این بانک داده به عنوان مرجع برای شناسایی گوه‌های ناشناخته استفاده می‌شود. آزمایشگاه‌های جهانی می‌توانند داده‌های GemTOF از زمردهای کلمبیایی اصیل را به اشتراک بگذارند تا نمونه‌های جدید با آن مقایسه شوند.

۴- مطالعه فیروزه با کمک GemTOF

فیروزه، این سنگ آبی‌سبز محبوب، مثال بسیار خوبی برای نشان دادن قدرت GemTOF است. فیروزه‌های معادن مختلف (مثلاً نیشابور در ایران، مصر یا معادن آریزونا در آمریکا) از نظر تاریخی و زیبایی‌شناسی ارزش متفاوتی دارند. یک کارشناس ممکن است نتواند تنها با نگاه کردن، فیروزه نیشابور اصیل را از یک نمونه مشابه دیگر تشخیص دهد. اما «اثر انگشت شیمیایی» این فیروزه‌ها با هم تفاوت دارد. این دستگاه نه تنها عناصر اصلی فیروزه (مس، آلومینیوم و فسفر) را اندازه می‌گیرد، بلکه به دنبال عناصر جزئی بسیار ریز (کم‌مقدار) مانند روی، سرب، باریم و به ویژه گروهی از عناصر به نام «خاکی‌های نادر» می‌گردد. نسبت و مقدار این عناصر کم‌مقدار، مانند یک کد پستی شیمیایی برای معدن فیروزه عمل می‌کند. فیروزه‌های مصنوعی یا بازسازی‌شده الگوی عناصر جزئی طبیعی را ندارند و GemTOF به راحتی چسب (معمولاً حاوی سیلیسیم) را در آنها تشخیص می‌دهد. بسیاری از فیروزه‌ها برای افزایش استحکام، با رزین یا پلاستیک بهسازی می‌شوند.

GemTOF می‌تواند حضور کربن و دیگر عناصر سازنده رزین را در منافذ سنگ تشخیص دهد. حتی می‌تواند دلیل علمی رنگ‌های مختلف فیروزه (آبی خالص تا سبز) را با اندازه‌گیری دقیق نسبت مس (عامل رنگ آبی) به آهن (عامل رنگ سبز) توضیح دهد.

۵- نتیجه گیری

دستگاه GemTOF مرزهای علم در گوهرشناسی را جابجا کرده است. این فناوری با ارائه تحلیلی سریع، دقیق و غیرمخرب***، نه تنها به خریداران و مجموعه‌داران اطمینان خاطر می‌دهد، بلکه ابزاری قدرتمند در دست پژوهشگران است تا اسرار تشکیل و رنگ‌آمیزی زیباترین سنگ‌های قیمتی جهان را کشف کنند. مطالعه فیروزه تنها یک مثال از توانایی‌های این دستگاه است***. در آینده، با گسترش بانک اطلاعاتی شیمیایی گوهرها، GemTOF به استاندارد طلایی برای اصالت‌سنجی و تعیین خاستگاه در آزمایشگاه‌های پیشرفته گوهرشناسی تبدیل خواهد شد.

۶- مراجع

- 1- Wang, H. A. O., Cartier, L. E., & Krzemnicki, M. S. (n.d.). GemTOF: A Pioneering Technique in Gemology. Swiss Gemological Institute SSEF, Basel, Switzerland
- 2- Wang, H. A. O., Krzemnicki, M. S., Chalain, J.-P., Lefèvre, P., Zhou, W., & Cartier, L. E. (2016). Simultaneous high sensitivity trace-element and isotopic analysis of gemstones using laser ablation inductively coupled plasma time-of-flight mass spectrometry. *The Journal of Gemmology*, 35(3)
- 3- Abduriyim, A., & Kitawaki, H. (2006). Determination of the origin of blue sapphires using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Journal of Gemmology*, 30(1/2), 23–36.
- 4- Bomal, F., Hatert, F., Philippo, S., Guennou, M., Depret, M., Wang, H., Lefèvre, P., & Erambert, M. (2025). Crystal chemistry and trace-element behaviour in tourmalines from Minas Gerais, Brazil. *European Journal of Mineralogy*, 37, 709–731. <https://doi.org/10.5194/ejm-37-709-2025>
- 5- Coenraads, R. R., Sutherland, F. L., & Kinny, P. D. (1990). The origin of sapphires: U-Pb dating of zircon inclusions sheds new light. *Mineralogical Magazine*, 54, 113–122.
- 6- Giuliani, G., Chaussidon, M., Schubnel, H.-J., Piat, D. H., Rollion-Bard, C., France-Lanord, C., Giard, D., de Narvaez, D., & Rondeau, B. (2000). Oxygen isotopes and emerald trade routes since antiquity. *Science*, 287(5453), 631–633.
- 7- Guillong, M., & Günther, D. (2001). Quasi 'non-destructive' laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry fingerprinting of sapphires. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 56(7), 1219–1231. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00185-9](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00185-9)
- 8- Halicki, P. (2013). Part I: Chemical characterization of gem quality sapphires from metamorphic and magmatic host rocks: a LA-ICP-MS study [Master's thesis, University of Basel].
- 9- Krzemnicki, M. S., Wang, H. A. O., Wälle, M., Lefèvre, P., Zhou, W., & Cartier, L. E. (2024). Gemmological characterisation of emeralds from Musakashi, Zambia, and implications for their geographic origin determination. *The Journal of Gemmology*, 39(4)

- 10- Krzemnicki, M. S., Wang, H. A. O., & Buche, S. (2021). A new type of emerald from Afghanistan's Panjshir Valley. *The Journal of Gemmology*, 37(5)
- 11- Krzemnicki, M. S., Leuenberger, A., & Balmer, W. A. (2023). Cobalt-bearing Blue Spinel from Lukande, near Mahenge, Tanzania. *The Journal of Gemmology*, 38(5)
- 12- Krzemnicki, M. S., Wang, H. A. O., Wälle, M., Lefèvre, P., Zhou, W., & Cartier, L. E. (2024). Gemmological characterization of emeralds from Musakashi, Zambia, and implications for their geographic origin determination. *The Journal of Gemmology*, 39(4)
- 13- Link, K. (2015). Age determination of zircon inclusions in faceted sapphires. *Journal of Gemmology*, 34(8), 692–700.
- 14- Nyfeler, D. (2016). 10 years of Laser Ablation - ICPMS Applied in Gem Labs. *Journal of the GAHK*, 37, 73–75.
- 15- Pay, D., Shigley, J., & Padua, P. (2014, August 26). *Carbon isotope studies reveal diamond growth history*. GIA. Retrieved August 26, 2016, from <http://www.gia.edu/gia-news-research-carnegie-carbon-isotope-studies-diamond>
- 16- Rankin, A. H., Greenwood, J., & Hargreaves, D. (2003). Chemical fingerprinting of some East African gem rubies by laser ablation ICP-MS. *Journal of Gemmology*, 28(8), 473–482.
- 17- Schwarz, D. (2015, December). The geographic origin determination of emeralds. *InColor, Special Issue*, 98–114.
- 18- Sutherland, F. L., Duroc-Danner, J. M., & Mettre, S. (2008). Age and origin of gem corundum and zircon megacrysts from the Mercaderes-Rio Mayo area, South-west Colombia, South America. *Ore Geology Reviews*, 34(1–2), 155–168. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.01.004>
- 19- Wang, H. A. O., Krzemnicki, M. S., Chalain, J.-P., Lefèvre, P., Zhou, W., & Cartier, L. E. (2016). Simultaneous high sensitivity trace-element and isotopic analysis of gemstones using laser ablation inductively coupled plasma time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Gemmology*, 35(3), 212–223. <https://doi.org/10.15506/JoG.2016.35.3.212>