Research Paper

Determining Trace Elements in Agricultural Products of Chogha Village of Arak, Iran [1]

Reza Pour Imani[*2], Mohammad Hossien Choopan Dastjerdi[3], Saeed Ghahani[4] and Marziyeh Mashayekhi[5]

Received: 2023.12.23
Revised: 2024.03.16
Accepted: 2024.05.18

Abstract

All human beings need healthy nutrition to grow, so the lack or excess of low-amount elements causes diseases in humans, for this reason, it is essential to know the presence of elements in food. Arak aluminum production factory is located next to Chogha village, so it is necessary to study the effects of this factory and other industries in the region on its agricultural products. In this study, the content of 11 elements was determined: aluminum, bromine, calcium, chlorine, iron, magnesium, manganese, potassium, sodium, scandium, and zinc in crops as wheat, barley, peas, beans and alfalfa prepared from the village of Chogha in the Arak region by neutron activation analysis, as well as 3 other elements, including arsenic, lead, and cadmium were determined by inductively coupled plasma analysis. Magnesium concentration from 1310 to 3970, manganese from 15.2 to 66.3, sodium from 14.2 to 1490, aluminum from 5.72 to 914, chlorine from 364 to 12000, calcium from 413 to 29600, bromine from 0.23 to 14.50, potassium from 4740 to 14700, iron from 10.1 to 1310.0, scandium from 0.033 to 4.02, zinc from 27.7 to 96.7, arsenic from 0.000 to 0.021, lead from 0.000 to 0.003 and cadmium from 0.00 to 0.02 mg/kg. The results show that the concentration of chlorine, manganese, magnesium, iron, sodium, aluminum, bromine, calcium, scandium, zinc, and lead in alfalfa, the concentration of potassium in pinto beans, the concentration of cadmium in barley, and the concentration of arsenic in wheat are higher than another analyzed sample.

Keywords: *Crops, Trace Elements, Neutron Activation Method, Inductively Coupled Plasma.*

---

[1] https://doi.org/10.22051/ ijap.2024.45958.1380
[2] Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Arak University, Arak, Iran. (Corresponding Author) Email: r-pourimani@araku.ac.ir
[3] Assistant of Professor, Reactor and nuclear safety research school, Nuclear Science and Technology Research Institute, Isfahan, Iran. Email: mdastjerdi@aeoi.org.ir
[4] M. Sc. graduated, Department of Physics, Faculty of Science, Arak University, Arak, Iran. Email: saeed.ghahani@gmail.com
[5] M. Sc. graduated, Department of Physics, Faculty of Science, Arak University, Arak, Iran. Email: marziyemashayekhi1@gmail.com

مقالهٔ پژوهشی

تعیین عناصر کم‌مقدار در محصولات کشاورزی روستای چقای اراک، ایران [1]

رضا پورایمانی*[2]، محمدحسین چوپان دستجردی[3]، سعید قاهانی[4] و مرضیه مشایخی[5]

فصلنامهٔ علمی فیزیک کاربردی ایران
دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه الزهرا
سال چهاردهم، پیاپی۳۸، پاییز ۱۴۰۳
صص ۲۱ - ۴۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹

چکیده:

همه انسان‌ها برای رشد به تغذیه سالم احتیاج دارند، به صورتی که کمبود یا فزونی عناصر کم‌مقدار سبب ایجاد بیماری‌هایی در انسان می‌شود. به همین دلیل آگاهی از وجود عناصر در مواد غذایی بسیار مهم است. به این دلیل که کارخانه تولید آلومینیوم اراک در جنب اراضی روستای چقا قرار دارد، مطالعه تأثیرات این کارخانه و سایر صنایع موجود در منطقه بر محصولات کشاورزی آن ضروری است. در این پژوهش غلظت ۱۱ عنصر آلومینیوم، برم، کلسیم، کلر، آهن، منیزیوم، منگنز، پتاسیم، سدیم، اسکاندیم و روی در محصولاتزراعی گندم، جو، نخود، لوبیا و یونجه تهیه شده از روستای چقای اراک با استفاده ازروش آنالیز فعال‌سازی نوترونی و ۳ عنصر دیگر شامل آرسنیک، سرب و کادمیوم با استفاده از آنالیز پلاسمای جفت‌شده القایی مشخص شده‌اند. غلظت منیزیم از ۱۳۱۰ تا ۳۹۷۰، منگنز ۱۵٫۲ تا ۶۶٫۳، سدیم از ۱۴٫۲۰ تا ۱۴۹۰، آلومینیوم از ۵٫۷۲ تا ۹۱۴، کلر از ۳۶۴ تا ۱۲۰۰۰، کلسیم از ۴۱۳ تا ۲۹۶۰۰، برم از ۰٫۲۳ تا ۱۴٫۵۰، پتاسیم از ۴۷۴۰ تا ۱۴۷۰۰، آهن از ۱۰٫۱ تا ۱۳۱۰٫۰، اسکاندیم ۰٫۳۳ تا ۴٫۰۲۰، روی از ۲۷٫۷ تا ۹۷٫۶، آرسنیک از ۰٫۰۰۰ تا ۰٫۰۲۱، سرب از ۰٫۰۰۰ تا ۰٫۰۰۳ و کادمیوم از ۰٫۰۰ تا ۰٫۰۲ برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست‌آمده است. نتایج نشان می‌دهد که غلظت کلر، منگنز، منیزیم، آهن، سدیم، آلومینیوم، برم، کلسیم، اسکاندیم، روی و سرب در یونجه، غلظت پتاسیم در لوبیا چیتی، غلظت کادمیوم در جو و غلظت آرسنیک در گندم نسبت به سایر نمونه‌های آنالیز شده بیشتر است.

واژگان کلیدی: *محصولات زراعی، عناصر کم‌مقدار، روش فعال‌سازی نوترونی، پلاسمای جفت شده القایی.*

---

[1] https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45958.1380

[2] استاد، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اراک، اراک، ایران. (نویسنده مسئول) Email: r-pourimani@araku.ac.ir

[3] استادیار، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشکده علوم و فنون هسته‌ای، اصفهان، ایران. Email: mdastjerdi@aeoi.org.ir

[4] دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اراک، اراک، ایران. Email: saeed.ghahani@gmail.com

[5] دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اراک، اراک، ایران. Email: marziyemashayekhi1@gmail.com

۱. مقدمه

عناصر کم‌مقدار در قالب ترکیبات شیمیایی هستند که به صورت طبیعی در پوسته زمین و موجودات زنده در غلظت‌های پایین وجود دارند. فعالیت‌های انسانی می‌تواند سطح عناصر کم‌مقدار را به صورت قابل توجهی در محیط افزایش دهد و در نهایت وارد زنجیره غذایی شود. این عناصر به عناصر ضروروی، کم‌تاثیر و سمی تقسیم می‌شوند. عناصر کم‌مقدار سمی مانند کادمیوم، سرب، آرسنیک و جیوه هیچ نقش مثبتی در سیستم زیست‌شناختی ندارند و می‌توانند اثرات مضری بر سلامت انسان داشته باشند. از این‌رو، عناصر کم‌مقدار نقش بسیار مهمی در سلامت افراد جامعه دارد [۱]. خوردن غذا یک مسیر معمولی برای دریافت عناصر کم‌مقدار توسط انسان است و همان طور که می‌دانیم بیشتر منبع تامین این عناصر مصرف محصولات کشاورزی است که از راه خاک به عنوان بستر گیاه به گیاه و از گیاه به دام و انسان منتقل می‌گردد. امروزه لزوم توسعه صنعت و فناوری سبب شده تا صنایع به محل تولید محصولات کشاورزی نزدیک گردند. به صورتی که آلاینده‌های صنعتی سبب آلودگی خاک‌های کشاورزی و محیط اطراف آن‌ها شده و بر روی محصولات کشاورزی تاثیر می‌گذارد. بنابراین کشاورزی در مناطق شهری یا نزدیک به مناطق شهری نیاز به آزمایش‌های شیمیایی و سم شناسی مداوم برای جلوگیری از ورود خوراک آلوده به بدن انسان دارد [۳-۲]. عناصر کم‌مقدار مفید در صورتی‌که از مقدار معینی در بدن انسان کم‌تر باشد، موجب بروز بیماری و اگر از مقدار مشخصی بیشتر باشد، سبب مسمومیت افراد می‌گردد. بدن انسان برای عناصر سمی دارای آستانه تحمل معینی است و در صورتی‌که از آن مقدار تجاوز کند، سبب مسمویت و اثرات مضر در افراد می‌گردد. در سال‌های کنونی، مطالعات گسترده‌ای در زمینه اندازه‌گیری عناصر کم‌مقدار در مواد غذایی انجام شده است و سطح دانش بشری نسبت به کیفیت مواد غذایی به مراتب بهبود پیدا کرده است [۴-۷]. هدف پژوهش حاضر، مشخص کردن غلظت عناصر کم‌مقدار در برخی از محصولات کشاورزی روستای چقا می‌باشد که این روستا در نزدیکی کلان شهر صنعتی اراک قرار دارد.

۲. روش انجام کار

۱.۲ منطقه مورد مطالعه

"چقا" نام روستایی در ضلع جنوبی و همجوار اراک و جنب اداره برق باختر است. اصل اسم این روستا "چاه آقا" بوده است. این روستا در گذشته‌ها دارای اراضی بسیاری بوده به صورتی که از شمال غربی به اراک، از جنوب به روستای حسین آباد و بغدادی (که الان کارخانجات و مراکز

تجاری و تولیدات بسیاری مابین آن‌ها قرار گرفته) و از غرب به اراک و روستاهای قنات (که اکنون منطقه‌ای از اراک است) و مابین قنات تا چقا، سازمان تره بار اراک، مرکز تولید بذر چقا، و حوزه علمیه خاتم الانبیاء و دانشگاه پیام نور و برق باختر در همجوار چقا قرار گرفته است. اطراف روستای چقا کارخانه‌های آلومینیوم ایران، ماشین‌سازی اراک، آذراب، هپکو، شهرک صنعتی شماره ۱، قطب صنعتی اراک، شهرک صنعتی خیرآباد و شهرک صنعتی ایبک آباد بالغ بر ۲۵۰۰ واحد کارگاهی وجود دارند. شکل (۱) موقعیت جغرافیای روستای چقا در نزدیکی شهر اراک را نشان می‌دهد. چقا در گذشته دارای باغات انگور بسیاری بوده و محصولات کشاورزی آن گندم، جو، یونجه، هندوانه، پنبه و دام‌پروری بوده است اما امروزه در گندم و جو و یونجه و هندوانه محدود می‌باشد. صنایع ایجاد شده در اراک آسیب بسیار جدی به کشاورزی این روستا وارد کرده، به صورتی که باغات آن از بین رفته است. آب کشاورزی این روستا از ابتدا با قناتی که بیان شد، تأمین شده و همچنان به همان میزان دارای آب است و چاهی که به وسیله موتور استخراج و پس از سال‌های طولانی و بازسازی در سال‌های کنونی مجددا مورد بهره‌برداری قرار گرفته است اما به خاطر وجود شهرنشینی و کارخانجات در اطرف چاه‌های آب قنات آب غیرقابل شرب است [۸-۹].در این پژوهش عناصر کم‌مقدار موجود در ۵ نوع محصول کشاورزی شامل گندم، جو، نخود، لوبیاچیتی و یونجه تولیدی در روستای چقا تهیه گردید. در این مطالعه غلظت ۱۱ عنصر آلومینیوم، برم، کلسیم، کلر، آهن، منیزیوم، منگنز، پتاسیم، سدیم، اسکاندیم و روی با استفاده از روش فعال-سازی نوترونی و ۳ عنصر دیگر شامل آرسنیک، سرب و کادمیوم با استفاده از آنالیز پلاسمای جفت‌شده القایی مشخص شدند.

شکل ۱ محل نمونه‌برداری و موقعیت روستای چقا.

۲.۲ نمونه‌برداری وآنالیز به روش پلاسمای القایی

در این مطالعه، ۵ نوع محصول کشاورزی شامل گندم، جو، نخود، لوبیاچیتی و یونجه از روستای چقای اراک تهیه گردید. نمونه‌ها با استفاده از آون ۸۰ درجه به مدت ۶ ساعت خشک شدند تا رطوبت موجود در آن‌ها از بین رود. سپس، با استفاده از هاون عقیق پودر گردیدند. یک سری نمونه برای بررسی از روش پلاسمای جفت شده القایی تهیه شد، که از هر نمونه مقدار ۲ گرم با ۲ سی‌سی هیدروکلریک‌اسید (با غلظت ۳۷ درصد) و ۲ سی‌سی نیتریک اسید (با غلظت ۶۵ درصد) در ظرف مخصوص ترکیب شد. نمونه‌ها برای هضم شدن به مدت یک ساعت در دستگاه هضم ماکروویو در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴۰ بار و قدرت ۹۰ وات قرار گرفتند. پس از آماده شدن نمونه‌ها، با استفاده از دستگاه مکنده وارد مه‌پاش شدند و به داخل دستگاه طیف‌سنجی انتشار اتمی پلاسمای جفت شده القایی تزریق گردیدند [۱۰]. دستگاه طیف‌سنج‌نوری (اسپکتروفوتومتر) پلاسمای جفت-شده القایی AES-ICP مدل Quant Plasma ۹۱۰۰ ، ساخت شرکت Analytik jena کشور آلمان می‌باشد. در این دستگاه از جدیدترین آشکارساز CCD استفاده شده‌است که امکان دسترسی به هر خط انتشار در محدوده طیفی ۱۶۰ تا ۹۰۰ نانومتر را فراهم می‌کند. به دلیل قابل دستیابی بودن خطوط انتشار بدون تداخل با حساسیت بسیار بالا در دستگاهICP-AES ، امکان تجزیه و تحلیل عناصر کم‌مقدار در نمونه‌ها با اطمینان بالا وجود دارد. نرم‌افزار Aspect PQ تولید همین شرکت کل فرآیند ICP-AES در مدل Plasma Quant ۹۱۰۰ هدایت، نظارت و مستند می-کند. این روش از جمله روش‌های طیف‌سنجی گسیلی اتمی است که در آن از راه جریان الکتریکی برای تغییر میدان مغناطیسی متغیر با زمان برای ایجاد القای الکترومغناطیسی و پدیدآوردن محیط گرم پلاسما استفاده می‌شود. تحریک اتم‌ها در این روش به کمک پلاسمای تولید شده توسط یک گاز نجیب (بیشتر آرگون و در موارد محدودی گاز هلیوم) صورت می‌گیرد [۵]. حساسیت این روش نسبت به روش‌های دیگر بسیار بیشتر است و از نظر حد تشخیص و تکرارپذیری به دلیل دارا بودن دمای ثابت خیلی بهتر است. با استفاده از این روش می‌توان غلظت بیشتر عناصر را در مقدار mg/kg و µg/kg اندازه‌گیری کرد [۱۰]. در این روش الکترودها کاملاً خارج از منطقه تحریک اتم‌ها هستند، بنابراین احتمال مزاحمت‌های شیمیایی در آن بسیار پایین است. چرا که، محیط شیمیایی خنثی و بدون اکسیداسیون است. در نتیجه، زمان ماندگاری پلاسما بیشتر و حساسیت اندازه‌گیری نیز به مراتب بهتر است.

۳.۲ بررسی به روش فعال‌سازی نوترونی

روش بررسی فعال‌سازی نوترونی روشی قدرتمند برای بررسی نمونه و مشخص کردن کیفی و کمی عناصر موجود در نمونه است. اساس این روش بر پایه تبدیل عناصر پایدار موجود در نمونه به هسته‌های پرتوزا با استفاده از تابش‌دهی نمونه با نوترون‌ها در یک راکتور هسته‌ای است. این هسته‌های پرتوزا ، متناسب با مشخصه نیمه‌عمرشان شروع به واپاشی می‌کنند و پرتوهای گاما با انرژی‌های مشخص و منحصر به‌فرد گسیل می‌کنند.

با مشخص کردن شمارش فوتون‌های گاما در قلّه‌های تمام انرژی، مقدار عنصر پایدار در نمونه محاسبه می‌گردد [۱۱]. برای این نوع بررسی به مقدار خیلی کمی از ماده در حد چند میلی‌گرم نیاز است و به صورت هم‌زمان می‌توان غلظت تعداد زیادی از عناصر را مشخص کرد [۶]. برای انجام این کار نمونه‌های پودر شده و از چهار نوع الک که آخرین شماره مش در حد میکرو بوده عبور داده شدند. نمونه‌های پودر به بخش رآکتور مینیاتوری - پژوهشکده رآکتور - مرکز اصفهان جهت پرتودهی و بررسی انتقال داده شدند. در مجموعه راکتور مینیاتوری اصفهان برای مشخص کردن مقدار عناصر از روش نسبی یا مقایسه‌ای استفاده می‌شود. در روش نسبی، نمونه مورد نظر با نمونه مرجع مقایسه می‌شود. نمونه مرجع نمونه‌ای است که غلظت عناصر موجود در آن، توسط سازمان بین‌المللی انرژی اتمی مشخص و گزارش شده است و با نمونه مجهول به صورت یکسان پرتودهی و شمارش می‌شوند.

جهت بسته‌بندی نمونه‌های مجهول و استاندارد از نایلون استفاده می‌شود، این نایلون‌ها به شکل مربعی با اضلاع ۶ سانتی‌متر هستند. با استفاده از یک ترازوی بسیار دقیق با دقت ۰٫۵ میلی‌گرم میزان ۱۲۲ میلی‌گرم از نمونه‌ها در داخل نایلون قرارداده می‌شود. تعداد چهار و یا پنج نوع نمونه و نمونه استاندارد به عنوان نمونه شاهد به ترتیب برای تابش‌دهی طولانی مدت و کوتاه مدت بسته‌بندی و آماده شدند. با توجه به تنوع ایزوتوپ‌های با نیمه‌عمر متفاوت که در یک نمونه وجود دارند، تعداد سه نمونه از یک نوع برای شناسایی ایزوتوپ‌های با نیمه‌عمر کوتاه، متوسط و بلند پرتودهی می‌گردند. باتوجه به نوع هسته پرتوزا و نیمه‌عمر آن برنامه‌ریزی برای طیف‌سنجی گاما انجام شد. هسته‌های پرتوزا با نیمه‌عمر کوتاه بلافاصله پس از خارج‌شدن با سامانه پنوماتیک به محفظه طیف‌سنجی ارسال می‌گردند. اگرچه، برای طیف‌سنجی هسته‌های پرتوزا با نیمه‌عمر متوسط و بلند، طیف‌گیری بعد از مدت مشخص صورت می‌گیرد تا در این مدت هسته‌های با نیم عمر کوتاه واپاشیده شده و مزاحمتی در طیف ایجاد نکنند که به این زمان، "زمان سرد شدن" می‌گویند. در جدول (۱) شرایط آزمایش و ثبت بیناب گاما و انرژی گامای مورد استفاده در مشخص کردن

ایزوتوپ مورد نظر داده شده است. برای محاسبه غلظت عناصر از رابطه (۱) استفاده می‌گردد که در آن C_S و C_R به ترتیب غلظت عنصر مورد نظر در نمونه و نمونه مرجع است.

$$C_S = C_R \frac{Act_S\,(e^{-\lambda t_d})_R}{Act_R(e^{-\lambda t_d})_S} \quad (۱)$$

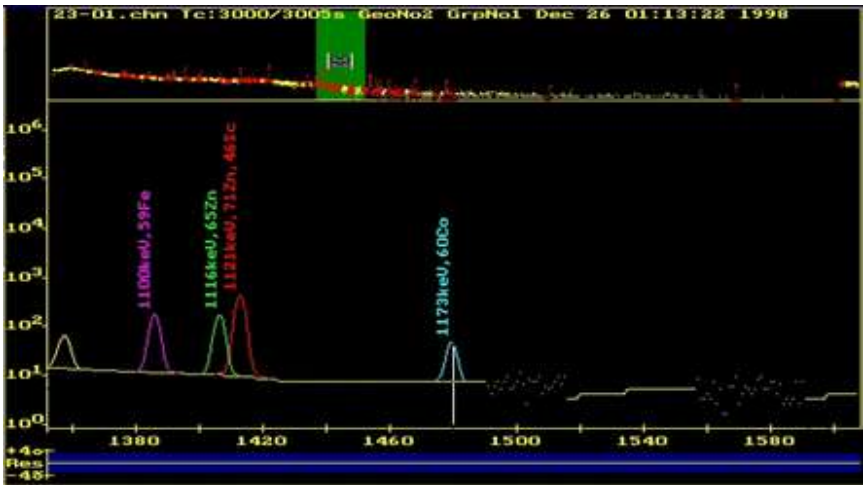
همچنین در این رابطه، Act_S و Act_R فعالیت هسته پرتوزا در نمونه و نمونه مرجع است که بر اساس شمارش تعداد فوتون زیر قلّه تمام انرژی مربوط به هسته پرتوزای تولیدی محاسبه می‌گردد، $(e^{-\lambda t_d})_R$ و $(e^{-\lambda t_d})_S$ به ترتیب ضریب واپاشی در نمونه مرجع و نمونه مورد مطالعه است و t_d زمان سرد شدن نمونه می‌باشد [۱۱].

۱.۳.۲ طیف‌نگاری گاما

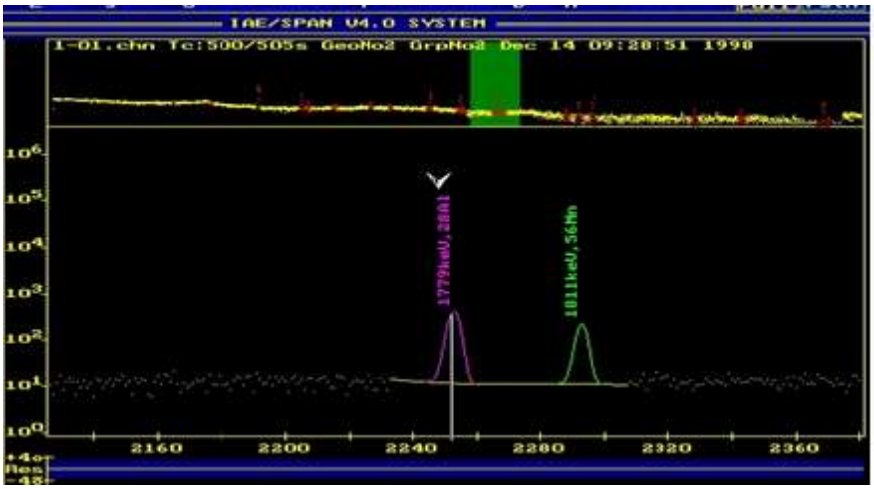
برای طیف‌سنجی گاما در این مطالعه از آشکارساز نیمه‌هادی فوق خالص ژرمانیوم (HPGe) ساخت شرکت EG&G ORTEC، مدل GEM-2180-P نوع POP-TOP استفاده شد. ولتاژ کاری این آشکارساز و نیم‌پهنای قلّه تمام انرژی گامای ۱۳۳۲ کیلو الکترون ولت متعلق به کبالت ۶۰ به ترتیب برابر ۳۰۰۰ ولت و ۲٫۱ کیلو الکترون ولت بود. این آشکارساز به یک تقویت‌کننده تپ و به یک سامانه تجزیه و تحلیل‌کننده ۴۰۰۰ کاناله متصل است و طیف‌های ثبت شده با کمک نرم افزار SPAN ذخیره می‌گردد. در شکل‌های (۲) و (۳)، نمونه طیف‌های ثبت شده توسط این آشکارساز نشان داده شده است. طیف‌ها بااستفاده از نرم‌افزار Gammavision Mastro II ساخت شرکت EG&G ORTEC تجزیه و تحلیل گردیدند. در این سامانه به کمک چشمه‌های مرجع کالیبراسیون بازدهی و انرژی انجام و غلظت عناصر با استفاده از مواد مرجع محاسبه شد [۱۲].

۳. نتایج و بحث

در شکل‌های (۲) و (۳) دو نمونه از طیف‌های ثبت شده نشان داده شده که نشان از کیفیت بالای طیف‌نگاری توسط این دستگاه دارد. در جدول (۱) شرایط پرتودهی و هسته‌های پرتوزای تولیدی مورد استفاده درج شده است. انرژی فوتون‌های گاما و نیمه عمر هسته‌های پرتوزای تولیدی در جدول آمده است [۱۳].



شکل۲ طیف عناصر نمونه یونجه با نیمه‌عمر بلند.



شکل۳ طیف عناصر نمونه لوبیاچیتی با نیمه‌عمر کوتاه.

جدول ۱ ایزوتوپ پرتوزا، نیمه‌عمر، انرژی گامای مشخصه، زمان پرتودهی و مدت زمان شمارش.

نماد عنصر	هسته پرتوزای تولید شده	زمان نیمه‌عمر	قلّه تمام انرژی پرتو گاما (keV)	شرایط اندازه‌گیری
Al	$^{28}_{13}$Al	۲٫۲۴(m)	۱۷۷۸٫۹۷	زمان تابش: ۱ دقیقه (زمان سرد شدن یک دقیقه) زمان شمارش: ۵۰۰ ثانیه شار نوترون: ۲٫۵×۱۰^{11} ($cm^{-2}.s^{-1}$)
Mg	$^{27}_{12}$Mg	۹٫۴۶(m)	۱۰۱۴/۵۲	
Ca	$^{49}_{20}$Ca	۸٫۷۱۸(m)	۳۰۸۴/۴۰	
Cl	$^{38}_{17}$Cl	۳۷٫۲۴(m)	۱۶۴۲٫۶۶	
Mn	$^{56}_{25}$Mn	۲٫۵۸(h)	۱۸۱۰٫۷۶	
Na	$^{24}_{11}$Na	۱۴٫۹۹۷(h)	۱۳۶۸٫۶۲	
As	$^{76}_{33}$As	۲۶٫۲۴(h)	۵۵۹٫۱۰۱	زمان تابش: ۱ دقیقه (زمان سرد شدن دو روز) زمان شمارش: ۱۰۰۰ ثانیه شار نوترون: ۲٫۵×۱۰^{11} ($cm^{-2}.s^{-1}$)
Br	$^{82}_{35}$Br	۳۵٫۴(h)	۶۵۴٫۷۵	
Zn	$^{65}_{30}$Zn	۲۴۴(d)	۱۱۱۵٫۵۴۶	زمان تابش: ۵ ساعت (زمان سرد شدن ۸ روز) زمان شمارش: ۳۰۰۰ ثانیه شار نوترون: ۲٫۵×۱۰^{11} ($cm^{-2}.s^{-1}$)
Cl	$^{51}_{24}$Cr	۲۷٫۷۰۴(d)	۳۲۰٫۰۸۲	
Sc	$^{46}_{21}$Sc	۸۳٫۷۹(d)	۸۸۹٫۲۷۱	

در جداول (۲) تا (۶)، غلظت عناصر اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها بر حسب mg/kg با خطای اندازه‌گیری درج شده است. غلظت عناصر در نمونه‌ها، منیزیم از ۱۳۱۰ تا ۳۹۷۰، منگنز ۱۵٫۲ تا ۶۶٫۳، سدیم از ۱۴٫۲ تا ۱۴۹۰، آلومینیوم از ۵٫۷۲ تا ۹۱۴، کلر از ۳۶۴ تا ۱۲۰۰۰، کلسیم از ۴۱۳ تا ۲۹۶۰۰، برم از ۰٫۲۳۴ تا ۱۴٫۵، پتاسیم از ۴۷۴۰ تا ۱۴۷۰۰، آهن از ۱۰٫۱ تا ۱۳۱۰، اسکاندیم ۰٫۳۲۸تا ۴٫۰۲، روی از ۲۷٫۷ تا ۹۷٫۶، آرسنیک از ۰/۰۰۰ تا ۰٫۰۲۱، سرب از ۰/۰۰۰تا ۰٫۰۰۳ و کادمیوم از ۰/۰۰ تا ۰٫۰۲ برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم، تغییر می‌کند.

برای مقایسه بهتر کمی عناصر، به صورت سه شکل متفاوت شامل عناصر میکرومعدنی، سمی و ماکرومعدنی به صورت نمودارهای ستونی فراوانی عناصر در نمونه‌ها در شکل‌های (۴) تا (۶) نشان داده شده است. همانطوری‌که در شکل‌های (۴) تا (۶) مشاهده می‌گردد، یونجه بیشترین غلظت عناصر را دارد و مقدارآلومینیوم در یونجه به ۹۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌رسد که نسبت به غلات مناطق دیگر بیش از چند برابر است [۱۴]. این غلظت نشان می‌دهد که محصولات زراعی اطراف مناطق صنعتی اراک تحت تاثیر آلاینده‌های کارخانه تولید آلومینیوم قرار داشتند. افزایش آلومینیوم در خاک سبب کاهش بازده تولید محصولات کشاورزی می‌گردد [۱۵].

جدول ۲ غلظت عناصر کم‌مقدار در نمونه جو برحسب (mg/kg).

ردیف	نام عنصر	غلظت (mg/kg)	خطا±
۱	Al	۷۳٫۹	۰٫۵
۲	As	BDL[1]	-
۳	Br	۱۰٫۱	۰٫۹
۴	Ca	۴۱۳	۳۳
۵	Cl	۱۱۸۰	۵۶
۶	Cd	۰٫۰۲۰	-
۷	Sc	۰٫۲۲۰	۰٫۰۲۸
۸	Pb	BDL	-
۹	Fe	۱۱۵	۲۱
۱۰	K	۵۱۱۰	۱۷۶
۱۱	Mg	۱۳۷۰	۴۹
۱۲	Mn	۲۴٫۷	۰٫۳
۱۳	Na	۳۱۰	۲۹
۱۴	Zn	۵۳	۲

[1] Below Detection Level _ (کمتر از حد تشخیص)

جدول ۳ غلظت عناصر کم‌مقدار در نمونه یونجه برحسب (mg/kg).

ردیف	نام عنصر	غلظت (mg/kg)	خطا±
۱	Al	۹۱۴	۲
۲	As	BDL	-
۳	Br	۱۴٫۵	۰٫۱
۴	Ca	۲۹۶۰۰	۶۷۸
۵	Cl	۱۲۰۰۰	۴۸۲
۶	Cd	۰٫۰۰۲	-
۷	Sc	۴٫۰۲	۰٫۱۰
۸	Pb	۰٫۰۰۳	-
۹	Fe	۱۳۱۰	۶۵
۱۰	K	۱۴۳۰۰	۸۴۵
۱۱	Mg	۳۹۷۰	۴۶۷
۱۲	Mn	۶۶٫۳	۰٫۵
۱۳	Na	۱۴۹۰	۵۴
۱۴	Zn	۹۷٫۶	۴٫۲

جدول ۴ غلظت عناصر کم‌مقدار در نمونه نخود برحسب (mg/kg).

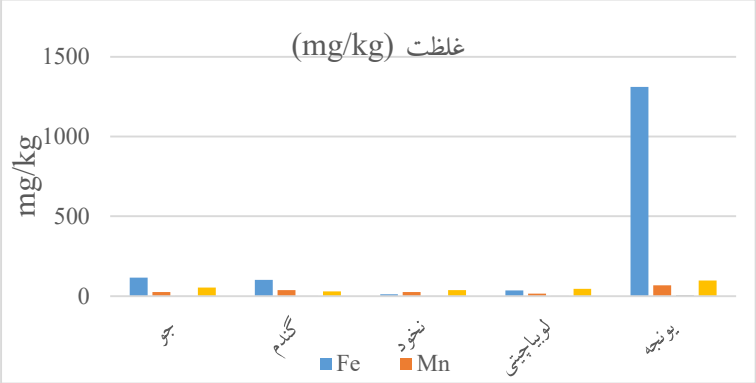
ردیف	نام عنصر	غلظت (mg/kg)	خطا±
۱	Al	۵/۷۲	۰/۱۶
۲	As	۰/۰۱۱	–
۳	Br	۴/۰۴	۰/۰۶
۴	Ca	۱۲۸۰	۴۶
۵	Cl	۱۳۵۰	۵۱
۶	Cd	BDL	–
۷	Sc	۰/۰۴۷۹	۰/۰۱۰۵
۸	Pb	BDL	–
۹	Fe	۱۰/۱	۲./۱
۱۰	K	۹۷۶۰	۶۹۳
۱۱	Mg	۱۳۱۰	۵۵
۱۲	Mn	۲۴	۰
۱۳	Na	۳۵/۸	۳/۳
۱۴	Zn	۳۶/۲	۲/۴

جدول ۵ غلظت عناصر کم‌مقدار در نمونه گندم برحسب (mg/kg).

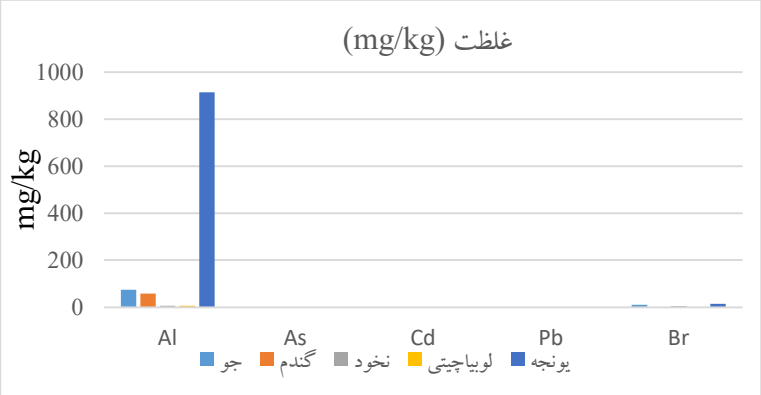
ردیف	نام عنصر	غلظت (mg/kg)	خطا±
۱	Al	۵۸	۶
۲	As	۰٫۰۲۱	–
۳	Br	۱٫۱۶	۰٫۰۵
۴	Ca	۵۷۳	۴۴
۵	Cl	۱۲۴۰	۵۸
۶	Cd	BDL	–
۷	Sc	۰٫۲۲۰	۰٫۰۲۹
۸	Pb	BDL	–
۹	Fe	۱۰۱	۱۸
۱۰	K	۴۷۴۰	۳۴۱
۱۱	Mg	۱۵۵۰	۷۷
۱۲	Mn	۳۷٫۲	۵٫۳
۱۳	Na	۳۲۰	۳۲
۱۴	Zn	۲۷٫۷	۲٫۱

جدول ۶ غلظت عناصر کم‌مقدار در نمونه لوبیا چیتی برحسب (mg/kg).

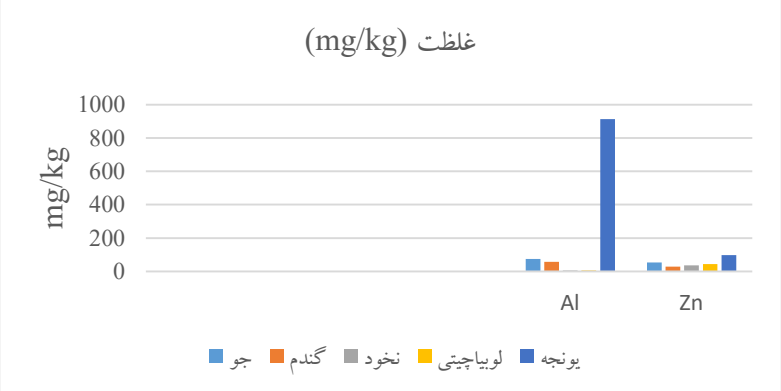
ردیف	نام عنصر	غلظت (mg/kg)	خطا±
۱	Al	۵٫۹۷	۰٫۱۴
۲	As	BDL	–
۳	Br	۰٫۲۳۴	۰٫۰۲۸
۴	Ca	۱۳۲۰	۴۱
۵	Cl	۳۶۴	۱۰
۶	Cd	BDL	–
۷	Sc	۰٫۰۳۳	۰٫۰۰۷
۸	Pb	BDL	–
۹	Fe	۳۵	۸
۱۰	K	۱۴۷۰۰	۵۴۰
۱۱	Mg	۲۱۱۰	۷۹
۱۲	Mn	۱۵٫۲	۲٫۲
۱۳	Na	۱۴٫۲	۲/۱
۱۴	Zn	۴۴٫۸	۲٫۷۳



شکل ۴ میکرومعدنی‌ها در نمونه‌ها برحسب (mg/kg).



شکل ۵ عناصر سمی در نمونه‌ها برحسب (mg/kg).



شکل ۶ ماکرومعدنی‌ها در نمونه‌ها برحسب (mg/kg).

۳. ۱ میانگین و حد مصرف گندم و عناصر کم‌مقدار گندم

طبق اعلام سازمان خوارو بار جهانی (FAO)، مصرف سرانه گندم در ایران ۴۵۸ گرم در روز و میانگین مصرف سالانه آن ۱۶۷/۸ کیلوگرم است که از میانگین جهانی (۵۷ کیلوگرم) به مراتب بالاتر است. از آنجایی که نان قوت غالب ایرانیان است، با محاسبه مقدار عناصر کم‌مقدار در ۴۵۸ گرم گندم به میزان دریافت آن توسط بدن با وزن ۷۰ کیلوگرم بر حسب درصد در جدول (۷) درج شده است. مقدار آستانه تحمل برای عناصر سمی و غیرضروروی و مقدار ضروروی برای عناصر مفید در کمیته مشترک سازمان بهداشت جهانی (WHO) و سازمان خوار و بار جهانی (FAO) درج شده است [۱۶]. که در این جدول (۷)، مقدار آلومینیوم دریافتی ۳۸ درصد آستانه تحمل و منیزیوم ۲۲۱ درصد نیاز بدن می‌باشد. با مقایسه جدول (۷) و مقدار مورد نیاز بدن انسان به صورت روزانه به عناصر کم‌مقدار در فصل اول، نتیجه می‌شود که گندم غنی از مواد ضروری یا عناصر کم‌مقدار ضروری چون منیزیم است. این به این معناست که با مصرف روزانه گندم می‌توان مواد ضروری بدن را تأمین کرد، حتی این جدول (۷) نشان می‌دهد که عنصر کم‌مقدار سمی مانند بُرُم به مقدار کمی در گندم وجود دارد.

جدول ۷ مقدار درصد میانگین عناصر کم‌مقدار در گندم.

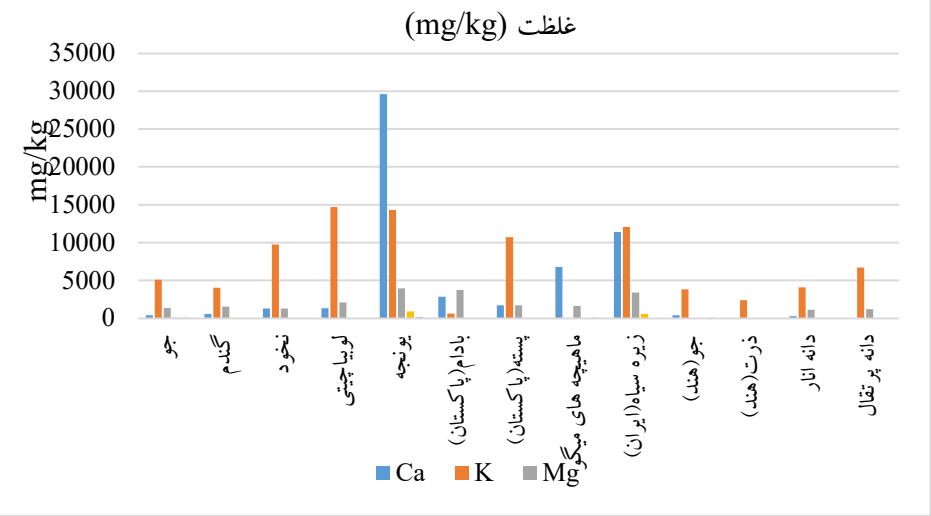
نام عنصر	مقدار مورد نیاز یا آستانه تحمل برای انسان [۱۶] (mg)	مقدار تامین میانگین عناصر کم‌مقدار از طریق مصرف گندم (%)	غلظت (mg/kg)	مصرف روزانه گندم (g/day)
Al	۷۰	۳۸	۵۸	۴۵۸
Br	۷۰	۱۰/۵	۱۶/۱	۴۵۸
Ca	۲۵۰۰	۱۰/۵	۵۷۳	۴۵۸
Cl	۱۰۰۰	۵۷	۱۲۴۰	۴۵۸
Mg	۳۵۰	۲۲۱	۱۵۵۰	۴۵۸
Mn	۱۱	۱۰	۲/۳۷	۴۵۸
Na	۲۳۰۰	۶/۴	۳۲۰	۴۵۸
Zn	۴۰	۳۱/۷	۲۷/۷	۴۵۸

۳. ۲ مقایسه نتایج بدست‌آمده از محصولات کشاورزی در این پژوهش با کشورهای مختلف

جدول (۸) و شکل (۷) مقایسه محصولات کشاورزی مورد پژوهش با برخی محصولات غذایی کشورهای مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، غلظت برخی عناصر مورد مطالعه بیشتر از سایر مواد غذایی در محصولات کشاورزی کشورهای مختلف است. غلظت کلسیم در جو کشت شده کمتر از جو کشت شده در هند است و غلظت آلومینیوم، منیزیم و کلسیم در یونجه و غلظت پتاسیم در لوبیا چیتی و غلظت روی در یونجه مورد مطالعه بیشتر از سایر محصولات کشورهای دیگر است [۲۰-۱۷].

جدول ۸ مقایسه بین محصولات مورد مطالعه وبرخی محصولات غذایی کشورهای مختلف برحسب (ppm).

نام نمونه	غلظت (mg/kg)					منابع	
	Al	Ca	K	Mg	Zn		روش اندازه‌گیری
بادام (پاکستان)	۱۲٫۴	۲۸۴۱	۶۰۲	۳۷۳۵	–	[۱۷]	فعال‌سازی نوترونی
جو (لتونی)	۴/۸۳	۷۹۴	۴۰۸۶	۱۴۵۳	۲۹/۶	[۱۸]	**ICP-AES**
یونجه		۲۵۰۰	۲۴۰۰۰	۲۲۶۵	۱۶/۳۲	[۱۹]	**XRF**
جو (هند)	–	۳۹۰	۳۸۴۰	–	۵۴٫۱	[۲۰]	فعال‌سازی نوترونی
ذرت (هند)	–	۴۸	۲۳۹۰	–	۱۴٫۵	[۲۰]	فعال‌سازی نوترونی
جو	۷۳٫۹	۳۱۰	۵۱۱۰	۱۳۷۰	۵۳	در این مطالعه	فعال‌سازی نوترونی و ICP-AES
یونجه	۹۱۴	۲۹۶۰۰	۱۴۳۰۰	۳۹۷۰	۹۷٫۶	در این مطالعه	فعال‌سازی نوترونی ICP-AES
نخود	۵٫۷۲	۳۵٫۸	۹۷۶۰	۱۳۱۰	۳۶٫۲	در این مطالعه	فعال‌سازی نوترونی ICP-AES
گندم	۵۸	۳۲۰	۴۷۴۰	۱۵۵۰	۲۷٫۷	در این مطالعه	فعال‌سازی نوترونی ICP-AES
لوبیا چیتی	۵٫۹۷	۱۴٫۲	۱۴۷۰۰	۲۱۱۰	۴۸٫۸	در این مطالعه	فعال‌سازی نوترونی ICP-AES



شکل ۷ نمودار ستونی مقایسه بین محصولات مورد مطالعه و برخی محصولات غذایی کشورهای مختلف برحسب (mg/kg).

۴. نتیجه‌گیری

نتایج بدست‌آمده و تجزیه و تحلیل آن‌ها نشان می‌دهد که منطقه تحت تاثیر آلاینده‌های صنعتی به ویژه گازهای متصاعد شده از کارخانه تولید آلومینیوم قرارگرفته است. غلظت کلر، منگنز، منیزیم، آهن، سدیم، آلومینیوم، برم، کلسیم، اسکاندیم در یونجه از سایر نمونه‌ها بیشتر است. غلظت پتاسیم در لوبیا چیتی بیشتر از دیگر نمونه‌هاست. غلظت کادمیم در جو و غلظت آرسنیک در گندم و سرب و روی در یونجه بیشتر از نمونه‌های مورد بررسی است. با توجه به میانگین مصرف مواد غذایی مقدار عناصر سمی از مقدار آستانه تحمل بیشتر نیست و بنابراین خطری سلامتی افراد را تهدید نمی‌کند.

۵. تشکر و قدردانی

این طرح با حمایت مالی شورای پژوهشی دانشگاه اراک و مرکز پژوهشگاه و توسعه راکتورهای هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران واحد اصفهان انجام شده است.بدین‌وسیله نویسندگان کمال سپاس‌گزاری و امتنان خود را از حامیان مالی این پروژه اعلام می‌دارند.

منابع

[1] El Youssfi, M., Sifou, A., Ben Aakame, R., Mahnine, N., Arsalane, S., Halim, M., Laghzizil, A. and Zinedine, A., "Trace elements in Foodstuffs from the Mediterranean Basin-Occurrence, Risk Assessment, Regulations, and Prevention strategies: A review". *Biol Trace Elem Res* 201, 2597-2626, 2023. https://doi.org/10.1007/s12011-022-03334-z

[2] Abbey, L., Ijenyo, M., Spence, B., Asunni, A.O., Ofoe, R. and Amo-Larbi, V., "Bioaccumulation of trace elements in vegetables grown in various anthropogenic conditions.", *Foods and Raw Materials*, 11(1), 10-16, 2023. https://doi.org/10.1139/cjps-2020-0291

[3] Pecina, V., Brtnický, M., Baltazár, T., Juřička, D., Kynický, J. and Galiová, M.V., "Human health and ecological risk assessment of trace elements in urban soils of 101 cities in China: a meta-analysis.", *Chemosphere* 267, 129215, 2021. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129215

[4] Fageria, N.K., Baligar, V.C. and Clark, R.B., "Micronutrients in crop production.", *In Advances in Agronomy*, 77, 185-268, 2002. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)77015-6

[5] Keshavarzi, B., Moore, F., Ansari, M., Rastegari Mehr, M., Kaabi, H. and Kermani, M., "Macronutrients and trace metals in soil and food crops of Isfahan Province, Iran.", Environ. Monit. *Assess*., 187, 4113, 2015. https://doi.org/10.1007/s10661-014-4113-y

[6] Singh, B.R., Gupta, S.K., Azaizeh, H., Shilev, S., Sudre, D., Song, W.Y., Martinoia, E. and Mench, M., "Safety of food crops on land contaminated with trace elements.", *Journal of the science of food and agriculture*, 91(8),1349-1366, 2011. https://doi.org/10.1002/jsfa.4355

[7] Kornblith, E.S., Casey, S.L., Lobdell, D.T., Colledge, M.A. and Bowler, R.M., "Environmental exposure to manganese in air: Tremor, motor and cognitive symptom profiles.", *Neurotoxic ology,* 64, 152-158, 2018. https://doi.org/ 152-158. 10.1016/j.neuro.2017.09.012

[8] Amado Lapeña, L.," Análisis del algoritmo PageRank: fundamento algebraico del orden de las búsquedas en Google.", 2021. https://fa.wikipedia.org/wiki/%DA%86%D9%82%D8%A7_(%D8%A7%D8%B1%D8%A7%DA%A9)

[9] The results of Iran's census in 2005. {National Portal of Statistics: Archived from the original version on 12. November 2013.

[10] Shunko, E.V., Stevenson, D.E. and Belkin, V.S., "Inductively Coupling Plasma Reactor with Plasma Electron Energy Controllable in the Range from ~6 to ~100 eV.", *IEEE Transactions on Plasma Science*, 42(3), 774-785, 2014.

[11] Thompson, M., "Recent trends in inter-laboratory precision at ppb and sub-ppb concentrations in relation to fitness for purpose criteria in proficiency testing.", *Analyst* 125(3), 385–386, 2000. https://doi.org/10.1039/b000282h

[12] Gilmore, G., "Practical Gamma-Ray Spectrometry", *John Wiley & Sons,* 2008. https://doi.org/10.1002/9780470861981

[13] Firestone, R.B., Shirley, V.S., Baglin, C.M., Chu, S.Y. and Zipkin, J., "The 8th edition of the Table of Isotopes.", *In Proceedings of the 9th International Symposium on Capture gamma-ray spectroscopy and related topics*, 2, 1997.

[14] Singh, V. and Garg, A.N., "Availability of essential trace elements in Indian cereals, vegetables and spices using INAA and the contribution of spices to daily dietary intake.", *Food chemistry*, 94(1), 81-89, 2006. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.10.053

[15] Shetty, R., Vidya, C.S.N., Prakash, N.B., Lux, A. and Vaculík, M., "Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review", *Science of The Total Environment*, 765, 142744, 2021. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142744

[16] Joint, F.A.O., "World Health Organization, and WHO Expert Committee on Food Additives", Evaluation of certain food additives and contaminants: seventy-third [73rd] report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. *World Health Organization*, 2011.

[17] Waheed, S., Siddique, N. and Rahman, A., "Trace element intake and dietary status of nuts consumed in Pakistan: study using INAA.", *Radiochimica Acta*, 95(4), 239-244, 2007. https://doi.org/10.1524/ract.2007.95.4.239

[18] Jakobsone, I., Zute, S., Bleidere, M., Kantane, I., Ece, L. and Bartkevics, V., "Macro and trace elements in oat cultivars bred in Latvia.", *Zemdirbyste-Agriculture*, 106(1), 21–28, 2019. https://doi.org/ 10.13080/z-a.2019.106.003

[19] Karayilanli, E. and Ayhan, V., "Investigation of feed value of alfalfa (Medicago sativa L.) harvested at different maturity stages.", *Legume Research-An International Journal,* 39(2), 237-247, 2016. https://doi.org/10.18805/lr.v0iOF.9292

[20] Singh, V. and Garg, A.N., "Availability of essential trace elements in Indian cereals, vegetables and spices using INAA and the contribution of spices to daily dietary intake.", *Food chemistry*, 94(1), 81-89, 2006. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.10.053

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).