



## مقاله پژوهشی

# ارزیابی غلظت و روند انتقال برخی از فلزات کمیاب در گیاه و مزرعه زعفران با استفاده از

## آنالیز فعال سازی نوترون

احسان تقی زاده طوسی\*

تاریخ دریافت: ۱۳ آذر ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: ۲۰ خرداد ۱۳۹۹

تقی زاده طوسی، ا. ۱۳۹۹. ارزیابی غلظت و روند انتقال برخی از فلزات کمیاب در گیاه و مزرعه زعفران با استفاده از آنالیز فعال سازی نوترون. زراعت و فناوری زعفران، ۸(۳): ۳۷۷-۳۹۷.

### چکیده

در این پژوهش غلظت وانادیوم، کروم، منگنز، کبالت، روی و آرسنیک در خاک و گیاه زعفران در دو شهرستان تربت حیدریه و زاوه به عنوان دو قطب تولید زعفران در جهان، با استفاده از روش فعال سازی نوترونی مورد ارزیابی قرار گرفت. غلظت کروم و کبالت در خاک از سطح مجاز سازمان بهداشت جهانی بسیار بالاتر و میزان غلظت عناصر وانادیوم، منگنز، روی و آرسنیک از سطح مجاز این سازمان کمتر، اندازه گیری شد. هیچ کمبود عناصر ضروری برای رشد گیاه زعفران در خاک مشاهده نشد. برای ارزیابی نتایج آنالیز فعال سازی نوترونی از دو آزمون آماری استفاده شد. نتایج آزمون تی جفت شده نشان داد که غلظت عناصر وانادیوم، منگنز، کروم و کبالت در عمق های مختلف خاک هم ارز بوده که بر توزیع یکنواخت این عناصر در خاک اشاره دارد. فقط غلظت فلز روی در بنه و خاک اطراف آن از نظر آماری هم ارز بود، که می تواند یکی از نشانه های روند حرکتی مناسب روی از خاک به گیاه زعفران باشد. همچنین این آزمون نشان داد که توزیع عناصر جذب شده در قسمت های هوایی گیاه زعفران یکنواخت بود. محاسبه ضریب همبستگی نیز نشان داد که افزایش غلظت روی در خاک باعث کاهش جذب کبالت و منگنز توسط گیاه زعفران می شود. براساس شاخص های آلودگی و زمین انباشت خاک تمامی مزارع زعفران شهرستان های تربت حیدریه و زاوه، بسیار زیاد به کروم آلوده اند. در مناطق مجاور هم در دو شهرستان (جنوب تربت حیدریه و غرب زاوه) سطح آلودگی خاک مزارع زعفران به آرسنیک، متوسط و در منطقه مرکزی زاوه بسیار زیاد ارزیابی شد. همچنین براساس شاخص آلودگی، به جز زعفران شرق زاوه و جنوب تربت حیدریه که به کروم آلوده بودند، محصول زعفران در تمام مزارع غیر آلوده تخمین زده شد. دو شاخص بار و درجه آلودگی، خاک مزارع زعفران را در مجموع به شدت آلوده ارزیابی کردند. همچنین براساس این دو آزمون به جز در منطقه شهری شهرستان تربت حیدریه که محصول زعفران در سطح متوسط آلودگی ارزیابی شد، محصول زعفران در شهرستان های تربت حیدریه و زاوه به صورت کلی غیر آلوده تخمین زده شد.

**کلمات کلیدی:** آنالیز فعال سازی نوترونی، شاخص های آلودگی، زعفران، عناصر کمیاب.

۱- استادیار گروه برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی و پژوهشگر پژوهشکده زعفران، دانشگاه تربت حیدریه، خراسان رضوی، ایران  
(\* -نویسنده مسئول: e.taghizadeh@torbath.ac.ir)

## مقدمه

زعفران با نام علمی *Crocus sativus* L.، یک گیاه پیازدار، بی‌ساقه و علفی چند ساله است. زعفران یک گیاه گل‌دار تک لپه‌ای<sup>۱</sup> است، که در تیره زنبقیان<sup>۲</sup> از راسته مارچوبه‌سانان<sup>۳</sup> طبقه‌بندی می‌شود کلاله قرمز رنگ زعفران، تنها بخش خوراکی گیاه زعفران است که از نظر اقتصادی به عنوان یکی از ارزشمندترین محصولات کشاورزی دسته‌بندی می‌شود (Esmaeili et al., 2013). این بخش از گیاه زعفران که شامل سه کلاله و ساقه آن‌ها تا بخش مادگی گیاه زعفران می‌باشد، به اختصار زعفران نیز نامیده می‌شود، که در صنایع غذایی و پزشکی نیز بسیار کاربرد دارد (Moratalla-López et al., 2019).

سطح زیر کشت زعفران ایران بالغ بر ۱۰۰ هزار هکتار است. ایران سالانه در حدود ۳۴۰ تن زعفران تولید می‌کند. بنابراین، حدود ۹۰ درصد زعفران جهان در ایران تولید می‌شود (Koocheki et al., 2019). زعفران در ۲۰ استان ایران کشت می‌شود. حدود ۹۰ درصد زعفران ایران در منطقه خراسان بزرگ (شامل استان‌های خراسان شمالی، جنوبی و رضوی) تولید می‌شود (Koocheki & Seyyedi, 2015). از طرف دیگر، دو شهرستان تربت حیدریه و زاوه در خراسان رضوی به عنوان مناطقی با بیشترین آمار تولید زعفران در جهان رتبه‌بندی شده‌اند (Koocheki et al., 2019)، بنابراین در این پژوهش دو شهرستان تربت حیدریه و زاوه به عنوان مناطق مورد مطالعه انتخاب شدند.

یکی از روش‌های مناسب برای رصد و کنترل آلودگی‌های زیست محیطی، اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین است. منابع فلزات سنگین در محیط متنوع است. با این حال، فعالیت‌های انسان مهم‌ترین عامل در افزایش آلودگی فلزات سنگین در محیط زیست است. گیاهان نقش اساسی در جابجایی فلزات سنگین و نادر از خاک به موجودات زنده دارند (Yadav, 2010)، بنابراین اندازه‌گیری آلودگی به عناصر کمیاب به ویژه فلزات سنگین به عنوان یک مشکل مهم در بهداشت محیط، محصول کشاورزی و انسان نقش عمده‌ای دارد، و به همین دلیل به طور قابل توجهی مورد توجه محققان قرار گرفته است (Nagajyoti et al., 2010).

بیش از ۳۰ عنصر معدنی در رشد و زندگی گیاهان و حیوانات نقش جدی دارند (Esmaeili et al., 2013). تعیین دقیق غلظت و قدرت جابجایی این عناصر به ویژه فلزات سنگین در نمونه‌های محیطی از جمله خاک مزارع و محصولات کشاورزی، یکی از اهداف و وظایف اساسی در بسیاری از علوم، مانند فیزیک پزشکی و بهداشت است، بنابراین تعیین غلظت عناصر کمیاب و فلزات سنگین در خاک و محصولات کشاورزی برای جلوگیری از خطرات احتمالی، به طور قابل توجهی ضروری است (Tousi et al., 2014b). طیف‌سنجی‌های جذب اتمی<sup>۴</sup> (Miroslawski & Pauksztó, 2018)، پلاسما جفت‌شده القایی<sup>۵</sup> (Salahinejad & Aflaki, 2010)، فعال‌سازی نوترونی<sup>۶</sup> (Tousi et al., 2014c) و فلورسانس اشعه ایکس<sup>۷</sup> (Abuarra

<sup>۱</sup> Monocots

<sup>۲</sup> Iridaceae

<sup>۳</sup> Asparagales

<sup>۴</sup> AAS: Atomic Absorption Spectroscopy

<sup>۵</sup> ICP: Inductively Coupled Plasma

<sup>۶</sup> NAA: Neutron Activation Analysis

<sup>۷</sup> XRF: X-Ray Fluorescence

گوگرد، آهن، منگنز، روی و مس در گیاه اخلاص ایجاد می‌کند (Chatterjee & Chatterjee, 2000). روی (Zn) به‌عنوان یک عنصر اساسی برای رشد موجودات زنده نقش مهمی ایفا می‌کند. از طرف دیگر، غلظت بیش از حد روی می‌تواند برای ادامه حیات موجودات زنده بسیار خطرناک باشد (Frassinetti et al., 2006).

هدف از این تحقیق تعیین غلظت برخی از فلزات و شبه‌فلزات سنگین در گیاه و خاک مزرعه زعفران است. همچنین، روند جابجایی این عناصر کمیاب از خاک به اجزای مختلف گیاه مورد بررسی قرار گرفته است، و همبستگی آن‌ها در گیاه و خاک، محاسبه شده است. سپس با استفاده از شاخص‌های آلودگی و زمین‌انباشت، سطح آلودگی خاک و محصول زعفران به یک عنصر خاص بررسی شد. در نهایت با محاسبه مقادیر درجه و بار آلودگی، سطح آلودگی کلی برای محصول زعفران و خاک مزارع تعیین گردید.

### مواد و روش‌ها

#### اندازه‌گیری غلظت عناصر با استفاده از روش فعال سازی نوترونی

در این روش، از نوترون به‌عنوان ذره بمباران‌کننده نمونه استفاده می‌شود. نوترون ذره‌ای بدون بار است، که می‌تواند به راحتی از سد نیروهای کولنی اتم عبور کند و با هسته هدف برخورد کند. فعال‌سازی نوترونی برای همه انواع نمونه قابل استفاده است. در نتیجه، در این روش نیازی به محلول‌سازی نمونه‌ها نیست. معادله اساسی در روش NAA، در رابطه ۱ نشان داده شده است (Loveland et al., 2017):

$$A = \varphi \sigma N_a \theta \frac{W}{M} (1 - e^{-\lambda t_i})(e^{-\lambda t_d}) \quad (1)$$

به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان رایج‌ترین تکنیک‌های تحلیلی در اندازه‌گیری فلزات سنگین و عناصر کمیاب برای نمونه‌های زیست‌محیطی گزارش شده‌اند. فعال‌سازی نوترونی، غیرمخرب و مستقل از فرآیندهای شیمیایی بوده و به‌عنوان روشی هسته‌ای (NAMs) طبقه‌بندی شده است (D'Angelo et al., 2001; Weise et al., 2001) با توجه به وجود زیرساخت‌های مناسب در کشور و همچنین دقت، سرعت و صحت بسیار زیاد روش فعال‌سازی نوترونی، این روش برای تعیین مقادیر بسیار کم عناصر در نمونه‌های محیطی، پیشنهاد شده است (Tousi et al., 2016).

برخی از محققان، مضرات غلظت بالای وانادیوم (V) در گیاه (مانند کاهش عملکرد ساقه و ریشه) را گزارش نموده‌اند (Vachirapatama et al., 2011). وانادیوم در خاک با غلظت کلی کمتر از ۲۵۰ (ppm)، تأثیر معنی‌داری در رشد گیاه ندارد (Larsson, 2014; Yang et al., 2017). کروم (Cr) به مقدار بسیار کم برای بدن انسان ضروری است (Yadav, 2010). مسمومیت با کروم باعث آسیب به ریشه گیاه و همچنین کاهش عملکرد گیاه می‌شود (WHO, 2011; ATSDR, 2012; Latif et al., 2018).

منگنز (Mn) به‌عنوان عنصر اساسی برای رشد گیاه بسیار ضروری است. کمبود منگنز به شدت بر تولید کلروپلاست آسیب وارد می‌کند (Buchanan et al., 2015). از طرف دیگر، غلظت بیش از حد منگنز به عمل فتوسنتز در گیاه آسیب وارد می‌کند (Millaleo et al., 2010). مسمومیت به کبالت (Co) در گیاه باعث کاهش رشد شاخه و به‌طور کلی کاهش عملکرد زیست‌توده‌ها می‌شود (Li et al., 2009). علاوه بر این، غلظت بالای Co می‌تواند بر فعالیت پروتئین، کلروفیل و آنزیم‌ها در گیاه تأثیر منفی بگذارد. همچنین، مسمومیت به کبالت در جذب فسفر،

(2019). چشمه‌های نوترونی را می‌توان در سه گروه اصلی طبقه‌بندی کرد: رادیو ایزوتوپ‌ها، ژنراتورهای نوترون و راکتورهای هسته‌ای. با توجه به شار نوترونی زیاد، یکنواخت، و پایدار در راکتورهای هسته‌ای، این چشمه نوترونی بسیار مناسب‌تر است (Bavarnegin et al., 2016). راکتور تحقیقاتی تهران (TRR)، در سال ۱۹۶۷ میلادی به عنوان یک راکتور آب سبک با سوخت اورانیوم بسیار غنی شده (LEU)، توسط ایالات متحده آمریکا ساخته شد. این راکتور در سال ۱۹۹۳ توسط آرژانتین به راکتور با سوخت کمتر غنی شده (LEU) تبدیل گردید (Lashkari et al., 2012). استخر TRR دارای دو بخش با کاربردهای متفاوت است، که در شکل ۱ نشان داده شده است. این راکتور شامل ۷ کانال پرتودهی با اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت است. A، C، D، E و G کانال‌های استوانه‌ای با شعاع ۱۵ سانتی‌متر و F کانال استوانه‌ای با شعاع ۲۰ سانتی‌متر می‌باشند. B نیز کانالی با سطح مقطع مربعی به ضلع ۳۰ سانتی‌متر است (Bavarnegin et al., 2016). در این تحقیق از کانال‌های A، D و G استفاده شد.

در این تحقیق، برای سنجش دقت روش فعال‌سازی نوترونی و تجهیزات مورد استفاده، از شاخص انحراف نسبی (RSD) استفاده شد. برای این منظور ابتدا انحراف معیار (δ) برای نتایج تکراری NAA در ۳ نمونه استاندارد معلوم، اندازه‌گیری شده و سپس با استفاده از رابطه ۴ شاخص RSD در این سه نمونه محاسبه گردید (Dong et al., 2019):

$$RSD = \frac{\delta}{\text{Mean of Data}} \times 100 \quad (4)$$

#### جمع‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌ها

موقعیت جغرافیایی استان خراسان رضوی و همچنین

که در آن A واپاشی هسته‌ای نمونه، φ شار نوترونی چشمه، σ سطح مقطع عنصر هدف با نوترون بمباران کننده، θ فراوانی ایزوتوپ مجهول، و λ ثابت واپاشی هسته رادیواکتیو تولید شده پس از بمباران نوترونی می‌باشند (Tousi et al., 2016). همچنین، Na عدد آوا گادرو، W جرم و M جرم اتمی عنصر مجهول است. به علاوه، ti و td به ترتیب زمان پرتودهی و زمان واپاشی نمونه می‌باشند (Loveland et al., 2017). تعیین راندمان آشکار ساز یکی از محدودیت‌های عملی و دشوار در روش فعال‌سازی نوترونی می‌باشد. علاوه بر این، ویژگی‌های واکنش انجام شده در این روش، به شدت به انرژی نوترون‌های بمباران کننده وابستگی دارد. برای جلوگیری از محاسبات پیچیده و مشکلات ذکر شده، معمولاً از روش فعال‌سازی نوترونی نسبی استفاده می‌شود که در آن، واپاشی‌های نمونه و کپسول استاندارد حاوی مقادیر مشخصی از عناصر معلوم که به‌طور هم‌زمان وارد راکتور شده‌اند، مقایسه می‌شوند. رابطه ۲ روش نسبی را نشان می‌دهد (Tousi et al., 2016):

$$\frac{A_{sam}}{A_{st}} = \frac{N_{sam}}{N_{st}} = \frac{W_{sam}}{W_{st}} \quad (2)$$

که در آن نمادهای sam و st به ترتیب نشان‌دهنده کمیت‌های مربوط به نمونه و استاندارد می‌باشند. غلظت جرمی عنصر مجهول (D) در نمونه با استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آید، که در آن G جرم کل نمونه می‌باشد (Loveland et al., 2017).

$$D = \frac{W_{sam}}{G} = \frac{W_{st} A_{sam}}{G A_{st}} \quad (3)$$

نوترون نقش مهمی در NAA ایفا می‌کند. بنابراین، منبع نوترون بخش بسیار اساسی در این روش است (Klix et al.,

۴Low Enriched Uranium

۵Relative Standard Deviation

۱ Radioactive decay

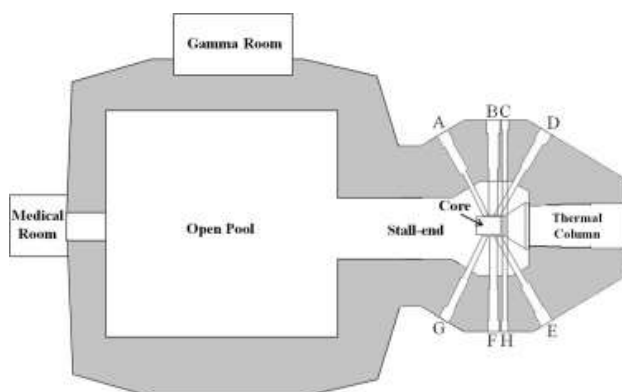
۲ Decay Constant

۳High Enriched Uranium

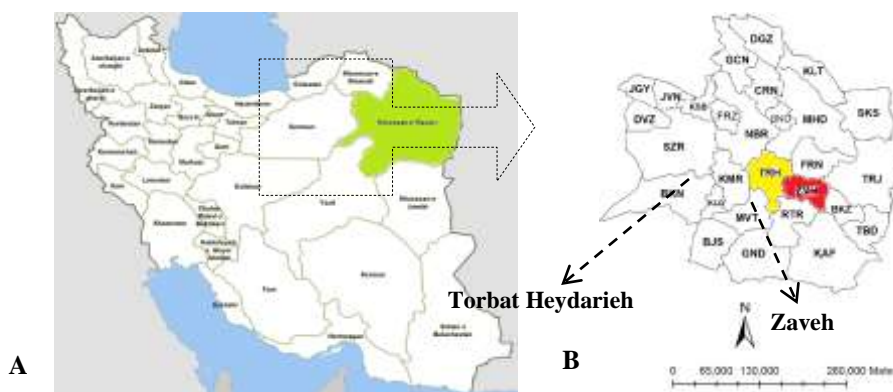
نوع نمونه گیاهی جمع‌آوری شد: (الف) بنه (B)، (ب) گلبرگ (P)، و (ج) کلاله (K) (Hassan-Beygi et al., 2010). با توجه به اینکه، بنه زعفران در عمق ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متری کشت می‌شود (Temperini et al., 2009)، دو نوع نمونه خاکی نیز از همان نقاطی که نمونه‌های گیاهی جمع‌آوری شدند، انتخاب گردیدند: (الف) خاک از سطح تا عمق ۱۵ سانتی‌متر (G) و (ب) خاک چسبیده به بنه در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر (GB).

شهرستان‌های تربت‌حیدریه و زاوه در شکل ۲ نشان داده شده است. تربت‌حیدریه در مرکز استان خراسان‌رضوی قرار دارد. این شهرستان از شمال با فریمان، مشهد و نیشابور همسایه است. همچنین کاشمر، رشتخوار و زاوه به ترتیب در غرب، جنوب و شرق تربت‌حیدریه قرار دارند. شهرستان زاوه که از سال ۱۳۸۷ (۲۰۰۸ میلادی) از تربت‌حیدریه جدا شده، از شمال با فریمان، از غرب به تربت‌حیدریه، از جنوب با رشتخوار و از شرق به تایباد و تربت‌جام محدود می‌شود.

بر اساس تقسیم‌بندی اندام گیاه زعفران، در این مطالعه سه



شکل ۱- راکتور تحقیقاتی تهران (Dastjerdi et al., 2016)  
Figure 1- Tehran Research Reactor (TRR) (Dastjerdi et al., 2016).



شکل ۲- (الف) موقعیت استان خراسان و (ب) موقعیت جغرافیایی شهرستان‌های تربت‌حیدریه و زاوه  
Figure 2- Iran (A); Torbat Heydarieh and Zaveh in Razavi Khorasan Province (B).

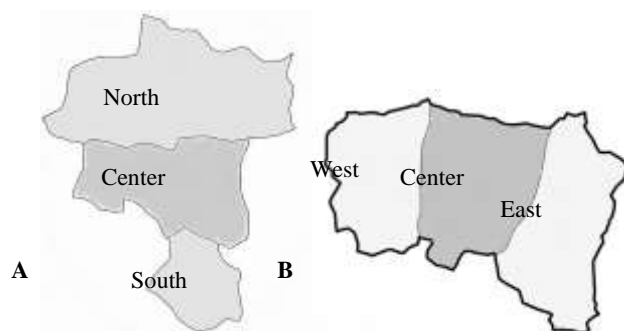
نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌بندی شده<sup>۱</sup> استفاده شد. در این روش،

بر اساس پژوهش‌های پیشین در تعیین عناصر کمیاب، روش

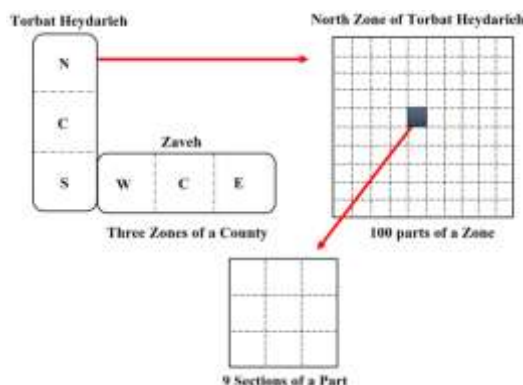
<sup>۱</sup> Stratified random sampling

این بخش‌ها نیز به ۹ مربع کوچکتر به نام برش، بخش‌بندی شدند (Tousi et al., 2014b; Funari et al., 2015; Tousi et al., 2015). شکل ۴ نمودار شماتیک از نحوه بخش‌بندی مناطق نمونه‌برداری را نشان می‌دهد، بنابراین مساحت هر یک از ۲۷۰۰ برش در شهرستان‌های تربت‌حیدریه و زاوه به ترتیب حدود ۲۳۰ و ۹۰ هکتار می‌باشند. در هر حوزه، ۴ بخش از گوشه‌های آن و یک بخش از مرکز آن انتخاب گردید. سپس برش وسط هر یک بخش‌های منتخب به عنوان ناحیه نمونه‌برداری مشخص شد. از هر برش منتخب، یک مزرعه با بالاترین سطح کشت و تولید به عنوان محل نمونه‌برداری برگزیده شد. پس در مجموع در هر شهرستان ۱۵ مزرعه برای برداشت نمونه انتخاب شدند.

ابتدا شهرستان‌های تربت‌حیدریه و زاوه از نظر جغرافیایی به سه حوزه تقسیم شدند (Funari et al., 2015; Metali et al., 2015). مساحت شهرستان تربت‌حیدریه در حدود ۶۱۷۵ کیلومترمربع است. شهرستان تربت‌حیدریه شکل عمودی دارد. بنابراین، برای نمونه‌برداری به سه حوزه شمال (N)، مرکز (C)، و جنوب (S) تقسیم شد، که در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. از طرفی، مساحت شهرستان زاوه حدود ۲۴۳۷ کیلومترمربع است و شکلی افقی دارد. بنابر (۳-ب)، شهرستان زاوه نیز به سه حوزه غرب (W)، مرکز (C)، و شرق (E) تقسیم شد. سپس، هر یک از حوزه‌های شهرستان‌های تربت‌حیدریه و زاوه به ۱۰۰ بخش ۱م ساوی تقسیم شدند. به عبارت بهتر، هر شهرستان به ۳۰۰ بخش مربعی تقریباً هم‌مساحت تبدیل شده، و هر یک از



شکل ۳- مناطق مورد مطالعه (الف): تربت‌حیدریه، (ب) زاوه  
Figure 3-Studied areas: (A): Torbat Heydarieh, (B): Zaveh.



شکل ۴- نمودار شماتیک تقسیم‌بندی مناطق مورد مطالعه  
Figure 4 – Schematic diagram of classification of studied areas.

عناصر کمیاب در خاک و زعفران را می‌توان به ترتیب X و Y نامید. تعداد هر یک از متغیرها n است. برای تعیین وابستگی این متغیرهای تصادفی از ضریب همبستگی خطی ( $r_{xy}$ ) استفاده شد، که در رابطه ۵ نشان داده شده است (Jackson, 2015; Tousei et al., 2016):

$$r_{xy} = \frac{Cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}; -1 \leq r_{xy} \leq +1 \quad (5)$$

که در آن  $Cov(x,y)$  همبستگی،  $\sigma_x$  و  $\sigma_y$  انحراف معیار متغیرها است (Rubin, 2013; Tousei et al., 2015). اگر متغیرهای X و Y به طور مستقیم در ارتباط باشند، ضریب همبستگی عددی مثبت و کوچکتر یا مساوی با یک خواهد بود. به عبارت بهتر، افزایش یک متغیر باعث افزایش متغیر دیگر می‌شود (Tousei et al., 2016). همچنین، ضریب همبستگی منفی بین دو متغیر، به معنی کاهش یک متغیر با افزایش متغیر دیگر است، که به آن همبستگی معکوس نیز گفته می‌شود (Lashkari et al., 2012).

برای ارزیابی میزان هم‌ارزی و شباهت غلظت یک فلز سنگین در گیاه زعفران با خاک زراعی از آزمون تی زوجی استفاده شد (Tousei et al., 2014a). در آزمون تی زوجی، مقادیر اندازه‌گیری شده برای یک عنصر در یکی از انواع نمونه‌ها، به عنوان مقدار ایده‌آل فرض شده و مقادیر آن عنصر در انواع دیگر از نمونه‌ها با آن مقایسه می‌گردد. فرضیه صفر ( $H_0$ ) بدین معنی است که میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده عنصر در دو نوع نمونه، با هم اختلاف معنی‌داری ندارند (Hatcher, 2003; Stern, 2010)، در حالی که فرضیه آزمایشی ( $H_1$ ) اختلاف مقادیر را معنی‌دار معرفی می‌کند (Tousei et al., 2018). رابطه ۶ معادلات آزمون تی را نشان می‌دهد.

نمونه‌ها از ۵ ناحیه (۴ گوشه و وسط) در هر مزرعه انتخاب گردیدند. نمونه‌های گیاهی و خاکی با استفاده از قیچی باغبانی، بیل، بیلچه و اوگر دستی، برداشت شد. قبل از شروع مراحل آماده‌سازی، نمونه‌های گیاهی شسته شده و با آب مقطر آب‌کشی می‌شوند. سپس رطوبت نمونه‌ها با هوای خشک محیط آزمایشگاه کاهش یافت. برای اینکه نمونه‌ها، آلودگی محیط را جذب نکنند، در مرحله خشک کردن، فضای آزمایشگاه و اتاق محل انبار نمونه‌ها کاملاً ایزوله شد. پس از آن نمونه‌ها با استفاده از هاون چینی، آسیاب برقی و الک ریز به پودرهای بسیار ریزی تبدیل شدند. در این مرحله معمولاً برای افزایش دقت در اندازه‌گیری عناصر کمیاب، نمونه‌ها را می‌سوزانند (Aldroobi et al., 2013). اما در روش NAA به دلیل دقت و سرعت بالا و همچنین با توجه تنظیم زمان پرتودهی و استراحت نمونه‌ها، نیازی به سوزاندن آن‌ها نیست (Tousei et al., 2016).

نمونه‌ها از پنج مکان مختلف در هر مزرعه جمع‌آوری شدند. با توجه به هزینه بالای آنالیز فعال‌سازی نوترونی، ۵ برداشت مختلف از هر مزرعه به صورت کاملاً همگن با هم مخلوط شدند، بنابراین برای هر نوع از نمونه‌ها پس از آماده‌سازی (به تعداد مزارع) در مجموع برای دو شهرستان ۳۰ نمونه برای انجام پرتودهی در راکتور TRR بسته‌بندی گردید.

#### اندازه‌گیری روند جابجایی عناصر کمیاب از خاک به گیاه زعفران

برای اندازه‌گیری روند انتقال عناصر کمیاب از خاک به قسمت‌های مختلف گیاه زعفران از تحلیل آماری نتایج طیف‌سنجی NAA استفاده شد. مقادیر اندازه‌گیری شده از

‡ Experimental Hypothesis

‡ Covariance

‡ Null Hypothesis

(Khorasanipour & Barvar, 2019).

$$Igeo_i = \log_2 \frac{C_i}{1.5 \cdot GB_i} \quad (۸)$$

درجه آلودگی (Cd) به صورت مجموع کل مقادیر شاخص آلودگی (Cf) برای همه عناصر مورد مطالعه در یک منطقه نمونه برداری خاص تعریف می شود، که میزان آلودگی کل نمونه را در آن منطقه نشان می دهد. درجه آلودگی نیز کمیته بدون واحد است که در معادله ۹ نشان داده شده است (Kowalska et al., 2018).

$$Cd = \sum_{i=1}^n Cf_i \quad (۹)$$

برای ارزیابی میزان کل آلودگی در نمونه های زیست محیطی یک منطقه، از شاخص بار آلودگی (PLI) نیز استفاده می شود. PLI میانگین هندسی شاخص آلودگی منطقه است و از معادله ۱۰ محاسبه می شود که در آن n تعداد عناصر آنالیز شده است. این معیار راهی آسان برای اثبات وخامت شرایط محیط زیستی مانند خاک و گیاه است (Bourliva et al., 2018).

$$PLI = \sqrt[n]{Cf_1 \times Cf_2 \times \dots \times Cf_n} \quad (۱۰)$$

معیار تعیین شدت آلودگی براساس شاخص آلودگی، زمین انباشت و درجه آلودگی، در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین،  $PLI \leq 1$  عدم آلودگی و  $PLI > 1$  آلودگی منطقه را نشان می دهد (Bourliva et al., 2018). شاخص های Cf و Igeo (Malinowska et al., 2015) آلودگی به هر یک از عناصر مورد مطالعه در هر منطقه تحقیقاتی ارزیابی می کند. درحالی که آلودگی کلی مزرعه و محصول زعفران با درجه آلودگی و شاخص بار آلودگی تخمین زده می شود.

### نتایج و بحث

#### ارزیابی دقت و صحت نتایج آنالیز فعال سازی نوترونی

برای هر یک از شش عنصر مورد مطالعه، میانگین انحراف

$$H_0: \Delta V = 0. \text{ and } H_1: \Delta V \neq 0 \quad (۶)$$

برای هر جفت از نمونه ها اگر مقدار p از ۰/۰۵ بزرگتر باشد، فرض صفر پذیرفته شده، که به معنی آن است که غلظت آن عنصر در دو نوع نمونه از نظر آماری معادل می باشد. به عبارت بهتر، روند جابجایی آن عنصر در دو نوع نمونه مقایسه شده بسیار زیاد است.

#### اندازه گیری میزان آلودگی خاک و محصول زعفران

در این تحقیق برای تخمین میزان آلودگی از چهار شاخص زیست محیطی استفاده شد. این شاخص ها به عنوان ابزارهای مفید برای ارزیابی جامع میزان آلودگی نمونه های زیست محیطی، به طور گسترده ای استفاده می شوند (Kowalska et al., 2018). این ارزیابی براساس میزان غلظت کل عنصر در نمونه می باشد (Jorfi et al., 2017; Proshad et al., 2017). شاخص آلودگی (Cf) ابزاری ساده و مؤثر برای نظارت بر آلودگی فلزات سنگین در نمونه های محیط زیستی از جمله نمونه های خاکی و گیاهی به حساب می آید، که یک کمیته بدون واحد است. Cf با استفاده از معادله ۷ محاسبه می شود، که در آن  $C_i$  غلظت عنصر i ام در نمونه می باشد. همچنین  $GB_i$  برای نمونه های خاکی غلظت میانگین عنصر i ام در طبیعت و برای نمونه های محصول زعفران حداکثر مقدار مجاز تعیین شده توسط FAO/WHO برای آن عنصر در مواد غذایی انتخاب شد.

$$Cf_i = \frac{C_i}{GB_i} \quad (۷)$$

معیار زمین انباشت (Igeo) برای ارزیابی شدت رسوب (افزایش غلظت) عناصر کمیاب به ویژه فلزات سنگین در زمینه طبیعی خاک سطحی، پیشنهاد شده است. این افزایش غلظت به واسطه متغیرهای متفاوت به خصوص بر اثر آلاینده های انسانی به وجود آمده که براساس رابطه ۸ تعریف می شود

۳ Contamination Degree

۴ Pollution Load Index

۵ Contamination Factor

۶ Index of geo-accumulation



گرفته و تأیید شد.

### غلظت عناصر کمیاب در زعفران و مزرعه

مقادیر غلظت وانادیوم و مقایسه آن در شکل ۵ نشان داده شده است. حد مجاز وانادیوم به صورت کلی، حدود ۲۵۰ ppm می باشد (Larsson, 2014; Yang et al., 2017). غلظت وانادیوم در خاک مزارع شهرستان‌های تربت حیدریه و زاوه (به جز شرق زاوه) در سطح مجاز اندازه‌گیری شد، که این نشان‌دهنده عدم آلودگی مزارع زعفران به وانادیوم است. در منطقه شرق زاوه که نزدیک مجموعه بزرگ معدنی سنگان می‌باشد، در خاک نزدیک بنه زعفران از حد مجاز وانادیوم بی‌شتی دارد. با توجه به نفوذ آب فقط تا عمق تقریباً ۳۰ cm در مزارع زعفران (که به دلیل شخم تا این عمق و سفتی زمین بعد از آن است)، می‌توان آلودگی خاک اطراف بنه را در این مناطق به آبیاری با آب آلوده به وانادیوم و یا رسوب ذرات گرد و غبار ناشی از معادن اطراف، نسبت داد.

معیار نسبی در سه نمونه تکراری محاسبه شد. سه کپسول استاندارد، هر یک حداقل ۶ بار وارد راکتور شده و غلظت عناصر آنها اندازه‌گیری شد. با استفاده از معادله ۴، RSD هر یک از عناصر در روش فعال‌سازی نوترونی در راکتور تحقیقاتی تهران محاسبه شد، که در جدول ۲ نشان داده شده است. هر چه اندازه شاخص RSD برای یک عنصر کمتر باشد، دقت روش فعال‌سازی نوترونی برای اندازه‌گیری آن بالاتر است. به طور معمول دقت با اندازه انحراف معیار نسبی کمتر از ۲۰ درصد، قابل قبول می‌باشد (McKenna et al., 2020)، که میانگین انحراف معیار نسبی برای هر ۶ عنصر کمتر از آن می‌باشد.

بنابراین براساس شاخص انحراف معیار نسبی، دقت این روش برای محاسبه هر ۶ عنصر قابل قبول است. NAA برای منگنز کم‌ترین، و برای کروم بیشترین دقت را دارد. همچنین صحت نتایج با اندازه‌گیری غلظت عناصر در نمونه‌های مرجع (استاندارد چند عنصری) و مقایسه نتایج به دست آمده از روش فعال‌سازی نوترونی با مقادیر تأیید شده آن، مورد ارزیابی قرار

جدول ۱- معیار سنجش آلودگی براساس شاخص‌های آلودگی

Table 1- Categories of contamination indexes

دسته Class آلودگی	Contaminated rate	میزان آلودگی	فاکتور آلودگی Cf	زمین‌انباشت Igeo <sup>c</sup>	درجه Cd <sup>b</sup> آلودگی
0	Uncontaminated	غیر آلوده	Cf < 1 <sup>a</sup>	Igeo ≤ 0	Cd < 5
1	Un/Moderately	آلودگی کم	1 ≤ Cf < 2 <sup>a</sup>	0 < Igeo ≤ 1	5 ≤ Cd < 10
2	Moderately	آلودگی متوسط	2 ≤ Cf < 3 <sup>a</sup>	1 < Igeo ≤ 2	10 ≤ Cd < 20
3	Moderately/Strongly	آلودگی نسبتاً زیاد	3 ≤ Cf < 6 <sup>b</sup>	2 < Igeo ≤ 3	
4	Strongly	آلودگی زیاد		3 < Igeo ≤ 4	
5	Strongly/Extremely	آلودگی بسیار زیاد	6 ≤ Cf <sup>b</sup>	4 < Igeo ≤ 5	
6	Extremely	به شدت آلوده		5 < Igeo	20 ≤ Cd

<sup>a</sup> (Jorfi, et al., 2017); <sup>b</sup> (Proshad et al., 2017); <sup>c</sup> (Malinowska et al., 2015).

جدول ۲- مقادیر انحراف معیار نسبی برای عناصر مورد مطالعه

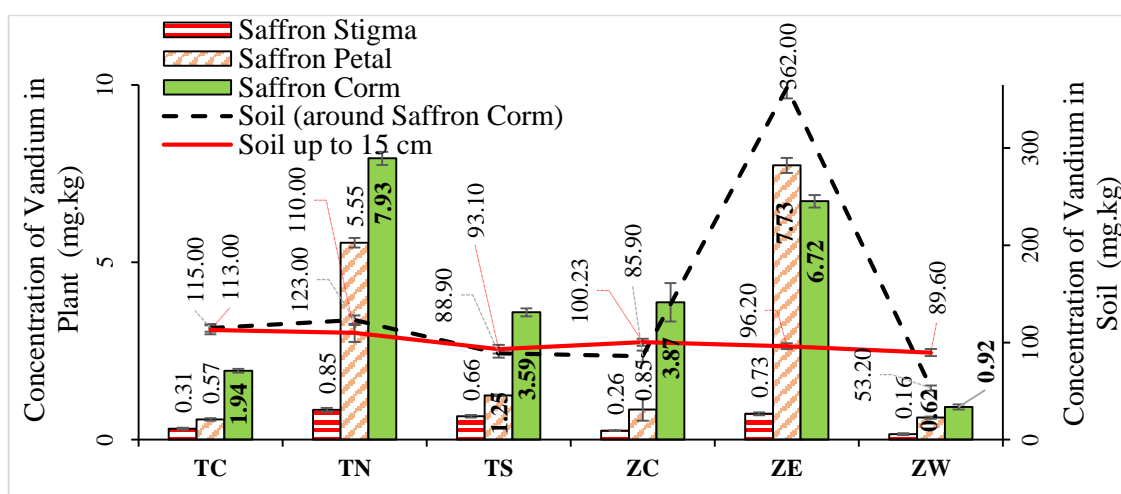
Table 2- Results of Relative Standard Deviation

Elements	RSD 1	RSD 2	RSD 3	Avr. RSDs
عناصر	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	میانگین برای هر ۳ نمونه
V (وانادیوم)	6.06	5.88	5.48	5.81
Mn (منگنز)	24.35	13.06	20.39	19.27
Cr (کروم)	1.93	2.42	1.34	1.89
Co (کوبالت)	2.54	2.37	1.91	2.27

Zn (روی)	8.07	5.51	4.59	6.06
Ar (آرسنیک)	4.38	3.22	3.47	3.69

شهرستان‌های تربت حیدریه و زاوه در محدوده ۰/۱۶ ppm-۰/۸۵ یافت شد، که در محدوده مجاز برای این فلز سنگین قرار دارد (WHO, 2011). همچنین، غلظت وانادیوم در بنه زعفران برای محیط کشت در شهرستان‌های تربت حیدریه و زاوه با مقادیر غلظت آن در تحقیقات قبلی برای کشت تحقیقاتی، مطابقت داشت (Esmaeili et al., 2013).

غلظت وانادیوم در مواد غذایی با مقادیر زیاد قند و نشاسته، بسیار کم است. به این ترتیب، وانادیوم در غلات، میوه‌ها و گوشت‌ها حدود ۵-۴۰ ppb<sup>۱</sup> گزارش شده است. همچنین، مقادیر وانادیوم در قارچ‌ها و سبزیجات برگی در محدوده ۱-۰/۱ ppm تعیین شده است (Anke, 2004; Imtiaz et al., 2018). غلظت وانادیوم در تمام قسمت‌های گیاه زعفران در



شکل ۵- مقدار غلظت عنصر وانادیوم در گیاه زعفران و خاک مزارع در مناطق مختلف (غرب زاوه: ZW، شرق زاوه: ZE، مرکز زاوه: ZC، جنوب تربت حیدریه: TS، شمال تربت حیدریه: TN، مرکز تربت حیدریه: TC)

Figure 5- Vanadium content of saffron and soil in different area (ZW: West of Zaveh, ZE: East of Zaveh, ZC: Center of Zaveh, TS: South of Torbat Heydarieh, TN: North of Torbat Heydarieh, TC: Center of Torbat Heydarieh).

و دارو سازمان ملل (FAO) و سازمان بهداشت جهانی حداکثر غلظت کروم در خاک به ویژه در مزارع کشاورزی ۳ ppm می‌باشد (WHO, 2011; Latif et al., 2018). غلظت کروم در خاک تمامی مزارع مورد مطالعه در این تحقیق بین ۱۰۰ تا ۶۰۰ برابر بیشتر از استاندارد است. همچنین، حداکثر میزان غلظت کروم در آب و گیاهان غیر خوراکی به ترتیب ۰/۱ mg.l<sup>-1</sup> و ۱/۳ mg.kg<sup>-1</sup> توسط سازمان بهداشت جهانی تعیین شده است.

غلظت کروم در خاک مزرعه زعفران و قسمت‌های مختلف گیاه زعفران در مناطق مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است. غلظت کروم به منطقه جغرافیایی و فعالیت‌های تخریبی انسان بسیار وابسته است، به طوری که در محدوده ۲۰۰۰-۱۰۰۰ ppm گزارش شده است (ATSDR, 2012). با این حال متوسط میانگین غلظت کل کروم در طبیعت بین ۱۴-۷۰ ppm می‌باشد (WHO, 2000). بر اساس پیشنهاد کمیته مشترک سازمان غذا

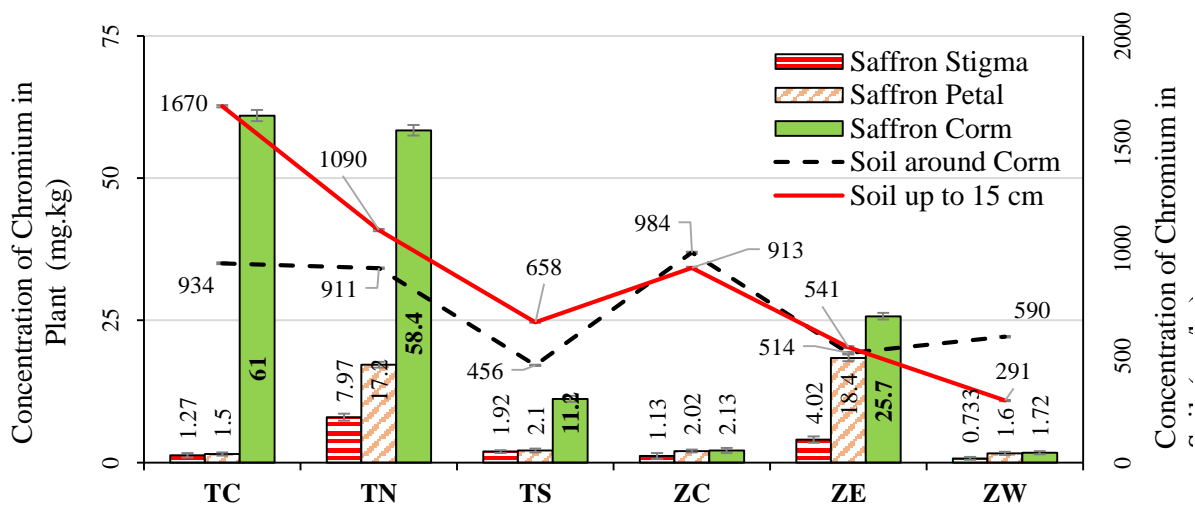
۴ Food and Agriculture Organization of the United Nations

۱ ppb= ug.kg-1

مناطق شرقی زاوه، شمال و جنوب تربت حیدریه به کروم آلوده بودند. منطقه شرق زاوه نزدیک مجتمع معدنی سنگان بوده و در شمال تربت حیدریه نیز مجتمع فولاد تربت حیدریه و کارخانجات تولید گندله آهن قرار دارند. همچنین، شهر تربت حیدریه در جنوب شهرستان تربت حیدریه واقع شده است، بنابراین از نتایج این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که آلودگی محصول زعفران به کروم به شدت به فعالیت‌های انسان وابسته است، که با نتایج تحقیقات پیشین سازگار است (ATSDR, 2012).

بنه و گلبرگ زعفران بخش‌های غیر خوراکی این گیاه می‌باشند. در تمامی مناطق مورد مطالعه، غلظت کروم در بنه و گلبرگ زعفران بیش از حد استاندارد اندازه‌گیری شده‌اند، بنابراین خاک مزارع زعفران، بنه و گلبرگ زعفران در شهرستان‌های تربت حیدریه و زاوه به شدت به فلز بسیار سرطان‌زای کروم آلوده هستند.

حد استاندارد غلظت فلز کروم در گیاهان تازه که مصرف غذایی دارند، ppm ۰/۰۷ می‌باشد (Basha et al., 2014). براساس پروتکل‌های سازمان بهداشت جهانی، کلاله زعفران در



شکل ۶- غلظت کروم در گیاه زعفران و خاک مزارع زعفران (غرب زاوه: ZW، شرق زاوه: ZE، مرکز زاوه: ZC، جنوب تربت حیدریه: TS، شمال تربت حیدریه: TN، مرکز تربت حیدریه: TC)

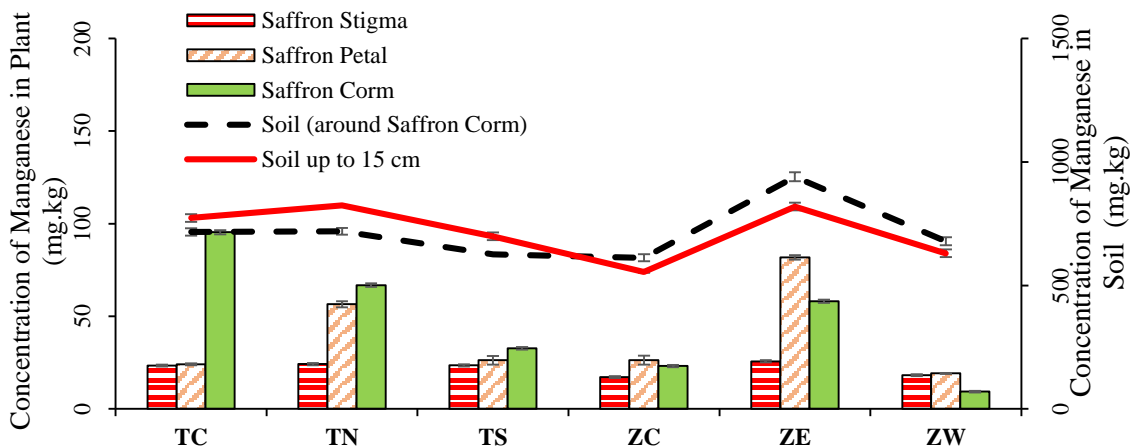
Figure 6- Chromium content of saffron plant and soil of farm (ZW: West of Zaveh, ZE: East of Zaveh, ZC: Center of Zaveh, TS: South of Torbat Heydarieh, TN: North of Torbat Heydarieh, TC: Center of Torbat Heydarieh).

می‌باشد. کمترین میزان غلظت منگنز در گیاهان ppm ۱۰ می‌باشد (Zanão Júnior et al., 2010). اگرچه منگنز برای رشد گیاه ضروری است، اما می‌تواند در غلظت‌های بیش از حد یک عنصر سمی باشد. بنابراین، محدوده غلظت منگنز در گیاهان متفاوت بین ppm ۱۰-۵۰۰ پیشنهاد شده است (Grygo-Szymanko et al., 2016). با توجه به اینکه غلظت این عنصر در تمامی نمونه‌های گیاه زعفران در شهرستان‌های تربت حیدریه

شکل ۷ غلظت منگنز را در نمونه‌های خاک و گیاه زعفران در شهرستان‌های تربت حیدریه و زاوه نشان می‌دهد. محدوده غلظت منگنز در خاک بین ppm ۲۰-۳۰۰۰ می‌باشد. میانگین غلظت کل منگنز در خاک حدود ppm ۴۳۷ است (Shao et al., 2017). غلظت منگنز در خاک مزارع زعفران در شهرستان‌های تربت حیدریه و زاوه بین ppm ۶۰۰-۹۴۰ اندازه‌گیری شد، که تقریباً در محدوده میانگین منگنز در خاک

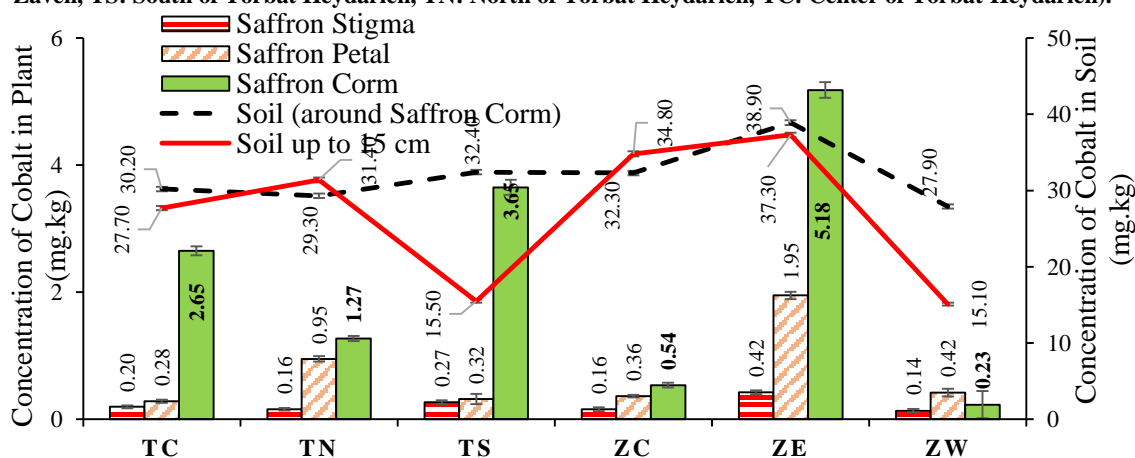
تقریباً بین ۱۰-۱۰۰ ppm می‌باشد، بنابراین کمبود یا مسمومیت به منگنز در گیاه زعفران در این مطالعه پیدا نشد. شکل ۸ غلظت کبالت در گیاه و خاک مزرعه زعفران در شهرستان‌های تربت حیدریه و زاوه نشان می‌دهد. متوسط غلظت عنصر کبالت در خاک حدود ۸ ppm می‌باشد (Kim et al., 2006)، که به عنوان استاندارد برای حداکثر مقدار مجاز کبالت در خاک در نظر گرفته شده است (Kim et al., 2006; McGrath et al., 2008; WHO, 2011; Vodyanitskii, 2016). بنابراین، تقریباً آلودگی خاک به کبالت در تمامی مناطق مورد مطالعه مشاهده می‌شود. از طرف دیگر، حد مجاز کبالت در گیاهان متفاوت حداکثر ۱۰ ppm می‌باشد (WHO/FAO, 2011; WHO, 2011; Noulas et al., 2018).

تقریباً بین ۱۰-۱۰۰ ppm می‌باشد، بنابراین کمبود یا مسمومیت به منگنز در گیاه زعفران در این مطالعه پیدا نشد. شکل ۸ غلظت کبالت در گیاه و خاک مزرعه زعفران در شهرستان‌های تربت حیدریه و زاوه نشان می‌دهد. متوسط غلظت عنصر کبالت در خاک حدود ۸ ppm می‌باشد (Kim et al., 2006)، که به عنوان استاندارد برای حداکثر مقدار مجاز کبالت در خاک در نظر گرفته شده است (Kim et al., 2006; McGrath et al., 2008; WHO, 2011; Vodyanitskii, 2016). بنابراین، تقریباً آلودگی خاک به کبالت در تمامی مناطق مورد مطالعه مشاهده می‌شود. از طرف دیگر، حد مجاز کبالت در گیاهان متفاوت حداکثر ۱۰ ppm می‌باشد (WHO/FAO, 2011; WHO, 2011; Noulas et al., 2018).



شکل ۷- غلظت منگنز در گیاه و خاک مزارع زعفران (غرب زاوه: ZW، شرق زاوه: ZE، مرکز زاوه: ZC، جنوب تربت حیدریه: TS، شمال تربت حیدریه: TN، مرکز تربت حیدریه: TC)

Figure 7- Manganese content of saffron and soil of saffron farm (ZW: West of Zaveh, ZE: East of Zaveh, ZC: Center of Zaveh, TS: South of Torbat Heydarieh, TN: North of Torbat Heydarieh, TC: Center of Torbat Heydarieh).

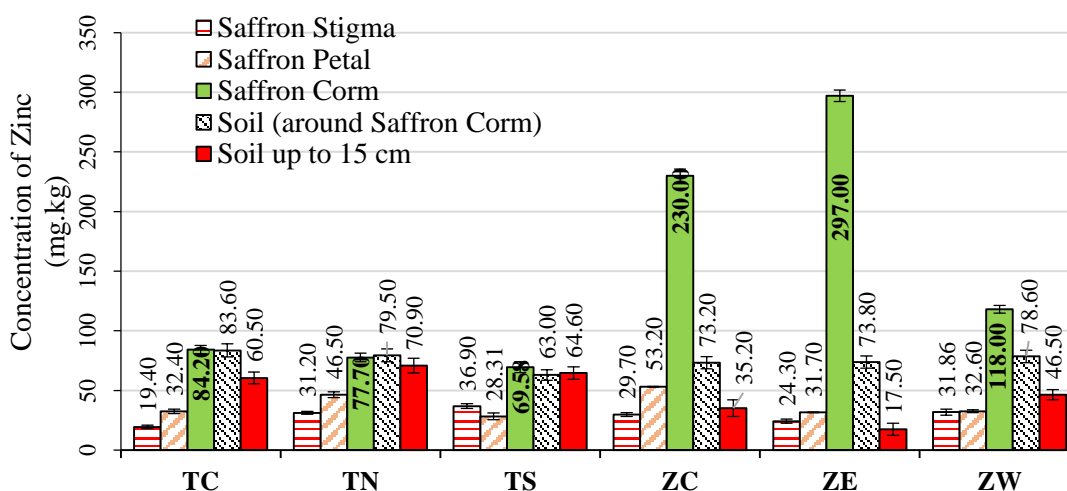


شکل ۸- غلظت کبالت در گیاه و مزرعه زعفران (غرب زاوه: ZW، شرق زاوه: ZE، مرکز زاوه: ZC، جنوب تربت حیدریه: TS، شمال تربت حیدریه: TN، مرکز تربت حیدریه: TC)

Figure 8- Cobalt content of saffron and soil of saffron farm (ZW: West of Zaveh, ZE: East of Zaveh, ZC: Center of Zaveh, TS: South of Torbat Heydarieh, TN: North of Torbat Heydarieh, TC: Center of Torbat Heydarieh).

مقادیر روی در نمونه‌های خاک مزرعه و زعفران در شکل ۹ نشان داده شده است. مقادیر غلظت روی برای تمام انواع نمونه‌ها در مناطق مختلف شهرستان‌های تربت حیدریه و زاوه در محدوده توصیه شده توسط FAO/WHO یافت شد. غلظت روی در بنه زعفران بین انواع نمونه‌های خاکی و گیاهی بالاترین مقادیر را نشان می‌دهد. میزان غلظت روی در بنه جوان زعفران با سن زیر ۴ سال (در هر دو مرحله خواب و بیداری) تقریباً در دامنه ۱۰ تا ۱۸ ppm در شرایط کشت آزمایشگاهی گزارش شده است

مقادیر روی در نمونه‌های خاک مزرعه و زعفران در شکل ۹ نشان داده شده است. مقادیر غلظت روی برای تمام انواع نمونه‌ها در مناطق مختلف شهرستان‌های تربت حیدریه و زاوه در محدوده توصیه شده توسط FAO/WHO یافت شد. غلظت روی در بنه زعفران بین انواع نمونه‌های خاکی و گیاهی بالاترین مقادیر را نشان می‌دهد. میزان غلظت روی در بنه جوان زعفران با سن زیر ۴ سال (در هر دو مرحله خواب و بیداری) تقریباً در دامنه ۱۰ تا ۱۸ ppm در شرایط کشت آزمایشگاهی گزارش شده است



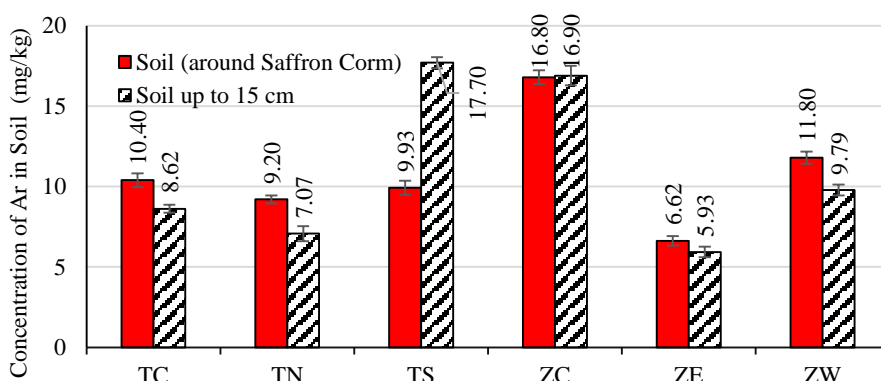
شکل ۹- غلظت روی در گیاه زعفران و خاک مزارع زعفران (غرب زاوه: ZW، شرق زاوه: ZE، مرکز زاوه: ZC، جنوب تربت حیدریه: TS، شمال تربت حیدریه: TN، مرکز تربت حیدریه: TC)

Figure 9- Zinc content of saffron and soil of saffron farm (ZW: West of Zaveh, ZE: East of Zaveh, ZC: Center of Zaveh, TS: South of Torbat Heydarieh, TN: North of Torbat Heydarieh, TC: Center of Torbat Heydarieh).

زیاد طیف‌سنجی فعال‌سازی نوترونی، گیاه زعفران تمایلی به جذب و انباشت آرسنیک در هیچ فرمی ندارد. شکل ۱۰ غلظت آرسنیک را در خاک مزارع زعفران نشان می‌دهد. حداکثر حد مجاز غلظت آرسنیک در خاک کشاورزی (ppm) ۲۵ است (Das et al., 2004). در این تحقیق، غلظت کل آرسنیک در خاک مناطق مختلف بین ۶۲/۶-۱۷/۷۰ ppm اندازه‌گیری شد.

آرسنیک یک شبه‌فلز بسیار خطرناک و سرطان‌زا، با عدد اتمی ۳۳ می‌باشد. سازمان بهداشت جهانی حداکثر مجاز غلظت آرسنیک را برای آب آشامیدنی و مواد غذایی، به ترتیب  $1 \text{ mg.l}^{-1}$  و  $1 \text{ mg.kg}^{-1}$  توصیه کرده است (Rana et al., 2018). در این مطالعه، غلظت آرسنیک در بخش‌های مختلف گیاه زعفران صفر اندازه‌گیری شد. با توجه به دقت و صحت بسیار

بنابراین تمام مقادیر اندازه‌گیری شده آرسنیک در خاک مزارع زعفران تربت حیدریه و زاوه کم‌تر از بیشینه مقدار مجاز آن است.



شکل ۱۰- غلظت آرسنیک در خاک مزارع زعفران (غرب زاوه: ZW، شرق زاوه: ZE، مرکز زاوه: ZC، جنوب تربت حیدریه: TS، شمال تربت حیدریه: TN، مرکز تربت حیدریه: TC)

Figure 10- Arsenic content in soil of saffron farm (ZW: West of Zaveh, ZE: East of Zaveh, ZC: Center of Zaveh, TS: South of Torbat Heydarieh, TN: North of Torbat Heydarieh, TC: Center of Torbat Heydarieh).

توزیع شده‌اند؛ در حالی که فلز روی در اعماق مختلف خاک مزرعه، یکنواخت توزیع نشده است. در جفت آماری بنه زعفران و خاک اطراف آن، فقط غلظت‌های عنصر روی هم‌ارز بوده که می‌تواند روند حرکتی قوی این فلز را از خاک به پیاز زعفران نشان دهد. غلظت ۴ عنصر وانادیوم، کروم، منگنز و کبالت بین بنه و بخش‌های علفی این گیاه، به‌ویژه گلبرگ زعفران هم‌ارز بوده که می‌تواند بر روند حرکتی این عناصر از بنه به گلبرگ اشاره داشته باشد. همچنین غلظت هر ۵ عنصر وانادیوم، کروم، منگنز، کبالت و روی در گلبرگ و محصول زعفران، معادل است، بنابراین این ۵ عنصر در بخش‌های بیرون از خاک گیاه زعفران تقریباً یکنواخت توزیع شده‌اند.

#### همبستگی بین عناصر کمیاب خاک و گیاه زعفران

در این پژوهش برای بررسی روند حرکتی و همبستگی غلظت عناصر از دو آزمون آماری استفاده شد. آزمون تی جفت‌شده برای بررسی و سنجش هم‌ارزی آماری مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت یک عنصر توسط طیف‌سنجی به روش فعال‌سازی نوترونی در دو نوع نمونه با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. جدول ۳ نتایج آنالیز آماری تی جفت‌شده برای ۵ جفت از انواع نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

براساس جدول ۳ غلظت عناصر وانادیوم، کروم، منگنز و کبالت بین خاک سطحی (تا عمق ۱۵ cm) و خاک اطراف بنه زعفران (عمق ۱۵ تا ۳۰ cm) هم‌ارزی آماری دارند. به عبارت بهتر، این ۴ عنصر به‌صورت تقریباً یکنواخت در خاک مزارع

جدول ۳- مقادیر پی اندازه‌گیری شده در آزمون تی جفت شده

Table 3- Results of Paired-sample T-test

انواع جفت نمونه‌ها Paired samples	P value سطح معناداری				
	وانادیوم V	کروم Cr	منگنز Mn	کبالت Co	روی Zn
SoS - SoC	0.452	0.407	0.979	0.200	0.028
SoC - SC	0.032	0.001	0.000	0.000	0.130
SP - SC	0.073	0.112	0.553	0.067	0.036
ST - SP	0.111	0.141	0.124	0.093	0.124

SoS: خاک تا عمق ۱۵cm؛ SoC: خاک در عمق بین ۱۵ تا ۳۰ cm؛ SC: بنه زعفران؛ SP: گلبرگ زعفران؛ ST: کلاله زعفران.  
SoS: Soil up to 15 cm; SoC: Soil around of saffron corm; SC: Saffron corm; SP: Saffron petal; ST: Saffron thread.

جدول ۴- ضریب همبستگی بین عناصر در نمونه‌های خاکی و گیاهی  
Table 4- Pearson correlation coefficients of trace elements in soil farm and plant of saffron

		ضریب همبستگی پیرسون										
		در گیاه زعفران						در خاک مزرعه				
		In saffron plant						In soil of saffron farm				
		وانادیوم	منگنز	کبالت	روی	کروم	وانادیوم	منگنز	کبالت	روی	کروم	آرسنیک
		V	Mn	Co	Zn	Cr	V	Mn	Co	Zn	Cr	As
در گیاه زعفران	V وانادیوم	1.00										
	Mn منگنز	<u>0.71**</u>	1.00									
	Co کبالت	<u>0.61**</u>	<u>0.60**</u>	1.00								
	Zn روی	0.45	0.18	<u>0.61**</u>	1.00							
	Cr کروم	0.28	<u>0.60**</u>	<u>0.76**</u>	0.19	1.00						
در خاک مزرعه	V وانادیوم	-0.08	-0.03	-0.01	-0.30	-0.06	1.00					
	Mn منگنز	0.45	0.47	0.44	-0.35	0.21	<u>0.70*</u>	1.00				
	Co کبالت	0.30	0.37	0.32	0.15	-0.10	0.42	0.35	1.00			
	Zn روی	-0.56	<u>-0.59*</u>	<u>-0.70*</u>	-0.43	-0.51	0.19	0.12	-0.09	1.00		
	Cr کروم	-0.27	-0.26	-0.26	-0.31	0.01	-0.25	0.03	-0.51	0.20	1.00	
As آرسنیک	-0.48	-0.50	-0.49	0.17	-0.01	-0.38	<u>-0.73**</u>	-0.35	0.06	-0.05	1.00	

\*\* ضریب همبستگی بسیار قوی با مقدار P کمتر از ۰/۰۱ و \* ضریب همبستگی قوی با مقدار P کمتر از ۰/۰۵.

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); \* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

وانادیوم و همبستگی معکوس بسیار قوی با آرسنیک دارد. بنابراین افزایش تجمع منگنز در خاک، می‌تواند به عنوان یکی از عوامل کاهش انباشت عنصر آرسنیک در خاک مزرعه مؤثر باشد. همچنین غلظت فلز روی در خاک با عناصر کبالت و منگنز در گیاه زعفران همبستگی قوی معکوس محاسبه گردید. به عبارت بهتر با افزایش غلظت روی در خاک مزرعه، احتمال انباشت عناصر کبالت و منگنز در محصول زعفران کاهش می‌یابد.

#### ارزیابی آلودگی مزرعه و محصول زعفران براساس شاخص‌های آلودگی

برای ارزیابی آلودگی خاک و محصول زعفران از شاخص‌های آلودگی استفاده شده است. در روابط ۷ و ۸،  $C_i$  معادل غلظت اندازه‌گیری شده عنصر  $A_m$  به روش فعال سازی نوترونی است که

جدول ۴ ضریب همبستگی بین عناصر در نمونه‌های خاکی و گیاهی را نشان می‌دهد. رابطه متغیرها با ضریب همبستگی نشان داده شده است. براساس نتایج جدول ۴، ۶ رابطه همبستگی بسیار قوی بین عناصر داخل گیاه زعفران وجود دارد، که معرف افزایش جذب یک عنصر به واسطه افزایش جذب عنصر دیگر در گیاه زعفران می‌باشد. غلظت کبالت در گیاه زعفران با ۴ عنصر وانادیوم، منگنز، روی و کروم در این گیاه همبستگی بسیار قوی دارد. علاوه براین، در گیاه زعفران، منگنز نیز دارای رابطه همبستگی قوی با عناصر وانادیوم و کروم بوده که نشان دهنده افزایش احتمال جذب منگنز به شرط افزایش جذب این دو عنصر در گیاه زعفران می‌باشد.

غلظت عنصر منگنز در خاک مزرعه، همبستگی قوی با

همچنین جدول ۶ مقادیر معیار زمین انباشت را برای نمونه‌های خاک مزارع زعفران مشخص می‌کند.

در شکل‌های ۵ تا ۱۰ نشان داده شده است. برای نمونه‌های خاکی از میانگین غلظت عنصر i ام در پوسته زمین و در محصول زعفران حد مجاز غلظت کل آن عنصر به عنوان GB<sub>i</sub> در این شاخص‌ها استفاده شده است. جدول ۵ نتایج شاخص‌های آلودگی (Cf)، درجه آلودگی (Cd) و بار آلودگی (PLI) را نشان می‌دهد.

جدول ۵- شاخص آلودگی عناصر در خاک و محصول زعفران

Table 5- Contamination factor of trace elements in soil farm and saffron thread

	In soil of saffron farm							In saffron thread						
	GB <sup>*A</sup> ppm	TC <sup>*</sup>	TN <sup>*</sup>	TS <sup>*</sup>	ZC <sup>*</sup>	ZE <sup>*</sup>	ZW <sup>*</sup>	GB <sup>*</sup> ppm	TC <sup>*</sup>	TN <sup>*</sup>	TS <sup>*</sup>	ZC <sup>*</sup>	ZE <sup>*</sup>	ZW <sup>*</sup>
V وانادیوم	150	0.76	0.78	0.61	0.62	1.53	0.48	1 <sup>B</sup>	0.31	0.85	0.66	0.26	0.73	0.16
Mn منگنز	437	1.70	1.77	1.52	1.33	2.01	1.50	500 <sup>C</sup>	0.05	0.05	0.05	0.03	0.05	0.04
Cr کروم	70	18.60	7.96	14.29	6.29	7.54	13.55	1.3 <sup>D</sup>	0.98	1.48	6.13	0.56	3.09	0.87
Co کبالت	8	3.62	3.79	2.99	4.19	4.76	2.69	10 <sup>E</sup>	0.02	0.02	0.03	0.02	0.04	0.01
Zn روی	55	1.31	1.37	1.16	0.99	0.83	1.14	250 <sup>F</sup>	0.06	0.10	0.12	0.10	0.08	0.11
Ar آرسنیک	5	1.90	1.63	2.76	3.37	1.26	2.16	----	----	----	----	----	----	----
Cd درجه آلودگی		27.89	17.29	23.33	16.79	17.92	21.52	درجه آلودگی <sup>G</sup>	1.42	2.50	6.99	0.97	3.99	1.19
PLI بار آلودگی		2.45	2.13	2.24	2.04	2.21	2.00	بار آلودگی <sup>H</sup>	0.11	0.17	0.24	0.10	0.20	0.09

TN: شمال تربت حیدریه، TC: مرکز تربت حیدریه، TS: جنوب تربت حیدریه، ZW: غرب زاوه، ZC: مرکز زاوه، ZE: شرق زاوه، GB: زمینه جهانی در خاک و حداکثر حد مجاز در مواد غذایی.

\*TN: North of Torbat Heydarieh, TC: Center of Torbat Heydarieh, TS: South of Torbat Heydarieh, ZW: West of Zaveh, ZC: Center of Zaveh, ZE: East of Zaveh, GB: Global Background in Soil & Permission Maximum Level in Food.

<sup>A</sup>(WHO, 2000), <sup>B</sup>(Imtiaz et al., 2018), <sup>C</sup>(Grygo et al., 2016), <sup>D</sup>(Basha et al., 2014), <sup>E</sup>(Gite et al., 2016), <sup>F</sup>(Noulas et al., 2018), <sup>G</sup>(Gondek, 2008), <sup>H</sup>(Antisari et al., 2011), <sup>K</sup>(Repula et al., 2012).

نشان می‌دهند. فقط جنوب تربت حیدریه که منطقه شهری این شهرستان را شامل می‌شود، در سطح متوسط آلودگی آرسنیک قرار دارد. غلظت بسیاری بالای فلزات کروم و نیکل در خاک مناطق مورد مطالعه و همچنین توزیع تقریباً یکنواخت این عناصر، می‌تواند حاکی از منشاء زمین‌شناختی آلودگی خاک به این فلزات در شهرستان‌های تربت حیدریه و زاوه باشند. در حالی که برای فلز آرسنیک مقادیر افزایش در شاخص‌های آلودگی و زمین‌انباشت در مناطق شهری، می‌تواند نشان‌دهنده منشاء انسان‌ساخت آلودگی خاک به آرسنیک باشد.

بر اساس ضرایب آلودگی محاسبه شده در جدول ۵ برای تمام مناطق مورد مطالعه، سطح آلودگی یک عنصر خاص برای هر یک از انواع نمونه‌ها تقریباً یکسان است. خاک مزارع زعفران تربت حیدریه به شدت به کروم آلوده بوده و آلودگی نسبتاً زیادی به کبالت را نشان می‌دهند، در حالی که به عناصر دیگر آلوده نمی‌باشند. در زاوه نیز خاک تمامی مناطق به شدت به کروم آلودگی می‌باشند. مزارع مرکز و شرق زاوه به کبالت آلودگی زیادی داشته و آلودگی زیاد به آرسنیک در این شهرستان نیز در منطقه شهری آن (مرکز زاوه) مشخص گردید. خاک مناطق غرب زاوه دارای سطح آلودگی متوسط به آرسنیک و کبالت را



جدول ۶- شاخص زمین‌انباشت عناصر در خاک  
Table 6- Index of geo-accumulation (Igeo) of trace elements in soil farm

	In soil of saffron farm			در خاک مزرعه		
	TC*	TN*	TS*	ZC*	ZE*	ZW*
V وانادیوم	-0.98	-0.95	-1.31	-1.27	0.03	-1.66
Mn منگنز	0.18	0.24	0.02	-0.17	0.42	0.00
Cr کروم	3.63	2.41	3.25	2.07	2.33	3.18
Co کبالت	1.27	1.34	1.00	1.48	1.67	0.84
Zn روی	-0.20	-0.13	-0.37	-0.61	-0.85	-0.40
Ar آرسنیک	0.34	0.12	0.88	1.17	-0.26	0.53

\*TN: شمال تربت حیدریه، TC: مرکز تربت حیدریه، TS: جنوب تربت حیدریه، ZW: غرب زاوه، ZC: مرکز زاوه، ZE: شرق زاوه.

\*TN: North of Torbat Heydarieh, TC: Center of Torbat Heydarieh, TS: South of Torbat Heydarieh, ZW: West of Zaveh, ZC: Center of Zaveh, ZE: East of Zaveh.

آزمون بار آلودگی یکسان است، به جز در جنوب شهرستان تربت حیدریه که PLI محصول زعفران را غیرآلوده و شاخص Cd محصول زعفران این منطقه را در سطح آلودگی متوسط ارزیابی می‌کند.

### نتیجه‌گیری

با استفاده از انحراف معیار نسبی و همچنین تکرار اندازه‌گیری غلظت عناصر برای کپسول‌های استاندارد حاوی غلظت معلوم، دقت و صحت روش فعال ساری نوترونی برای تشخیص غلظت عناصر وانادیوم، منگنز، کروم، کبالت، روی و آرسنیک در زعفران و مزرعه آن تأیید گردید. براساس نتایج این مطالعه، غلظت وانادیوم، روی، آرسنیک و منگنز در مزارع زعفران در محدوده میزان توصیه شده WHO مشاهده شد. با این حال غلظت کبالت و کروم در خاک مزارع تربت حیدریه و زاوه از حد مجاز بسیار بالاتر اندازه‌گیری شد. کمبود منگنز، روی و کبالت، به عنوان عناصر اساسی در رشد گیاه زعفران، یافت نشد. علاوه بر این، غلظت منگنز، روی، کبالت و آرسنیک در گیاه زعفران با استاندارد FAO/WHO مطابقت داشت. براساس آزمون T جفت

سطح آلودگی خاک مزارع زعفران به عناصر وانادیوم، منگنز، روی و آرسنیک براساس شاخص‌های آلودگی و زمین‌انباشت، تقریباً یکسان به‌دست آمد. در حالی که مقادیر کم‌تر زمین‌انباشت، آلودگی خاک به کروم و کبالت را در دو سطح کم‌تر نسبت به شاخص آلودگی نشان می‌دهد. محصول زعفران براساس شاخص آلودگی در گیاهان (Repula et al., 2012) و جدول ۵، هیچ آلودگی به عناصر مورد مطالعه را نشان نمی‌دهند، به‌جز زعفران شرق زاوه و جنوب تربت حیدریه که آلودگی زیادی به کروم دارد.

شاخص بار آلودگی خاک مزارع را به طور کلی در هر دو شهرستان کامل آلوده نشان می‌دهد. در حالی که براساس شاخص بار آلودگی برای گیاهان (Antisari et al., 2011) هیچ آلودگی در محصول زعفران در این مناطق وجود ندارد. درجه آلودگی نیز، سطح آلودگی خاک مزارع را در غرب زاوه، مرکز و جنوب تربت حیدریه به شدت آلوده نشان داده و درجه آلودگی خاک در مناطق دیگر را (با یک سطح آلودگی کم‌تر) در حد بسیار آلوده ارزیابی می‌کند. نتیجه ارزیابی آلودگی محصول زعفران با استفاده از شاخص درجه آلودگی برای گیاهان (Gondek, 2008)، با نتایج

حیدریه و غرب زاوه) نشان دادند. در حالی که براساس این دو شاخص، خاک مزارع زعفران در منطقه مرکز زاوه بسیار زیاد به آر سنیک آلوده بود. براساس این دو آزمون محصول زعفران در تمام مزارع غیر آلوده تخمین زده شد، به جز زعفران شرق زاوه و جنوب تربت حیدریه که آلودگی زیادی به کروم دارد. دو شاخص بار و درجه آلودگی خاک مزارع زعفران را در مجموع به شدت آلوده ارزیابی کردند، به جز منطقه جنوب شهرستان تربت حیدریه که منطقه شهری این شهرستان است و دو شاخص بار و درجه آلودگی سطح آلودگی محصول زعفران را متوسط ارزیابی کرد، محصول زعفران در مناطق دیگر براساس این دو آزمون به صورت کلی غیر آلوده تخمین زده شد.

### سپاسگزاری

این تحقیق توسط دانشگاه تربت حیدریه با کد تحقیقاتی ۳۳ پشتیبانی مالی شده است.

شده عناصر کبالت، کروم، وانادیوم و منگنز به طور یکنواخت در عمق های مختلف خاک مزرعه تجمع کرده اند. همچنین این آزمون نشان داد که فقط غلظت روی در بنه زعفران و خاک هم ارز بودند. علاوه بر این، غلظت هر ۵ عنصر مذکور در قسمت های بیرون از خاک گیاه زعفران، با یکدیگر هم ارز بوده که نشان دهنده توزیع یکنواخت این عناصر در این قسمت های گیاه زعفران می باشد. محاسبه ضریب همبستگی نشان داد که افزایش غلظت روی در خاک می تواند احتمال جذب کبالت و منگنز توسط گیاه زعفران را کاهش دهد. محاسبه شاخص آلودگی نشان داد که تمامی مزارع زعفران شهرستان های تربت حیدریه و زاوه در بالاترین سطح آلودگی به کروم قرار داشتند. با این حال شاخص زمین انباشت سطح آلودگی به کروم را در مزارع زعفران دو سطح پایین تر و در حد بسیار آلوده تعیین کرد. هر دو کمیت Cf و Igeo سطح متوسط آلودگی خاک مزارع زعفران را به آر سنیک در مناطق مجاور هم در دو شهرستان (جنوب تربت

### منابع

- Abuarra, A., Bauk, S., Hashim, R., Kandaiya, S., Tousi, E.T., and Ababneh, B., 2014. XRF technique for the evaluation of gum arabic bonded *Rhizophora* spp. particleboards as tissue equivalent material. *International Journal of Applied Physics and Mathematics* 4: 201-204.
- Aldroobi, K.S.A., Shukri, A., Bauk, S., Munem, E.M.A., and Abuarra, A. 2013. Determination of arsenic and mercury level in scalp hair from a selected population in Penang, Malaysia using XRF technique. *Radiation Physics and Chemistry* 91: 9-14.
- Anke, M. 2004. Vanadium: An element both essential and toxic to plants, animals and humans. *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia* 70: 961-999.
- Antisari, L.V., Carbone, S., Ferronato, C., Simoni, A., and Vianello, G. 2011. Characterization of heavy metals atmospheric deposition for assessment of urban environmental quality in the Bologna city (Italy). *EQA-International Journal of Environmental Quality* 7: 49-63.
- ATSDR, 2012. Toxicological profile for Chromium. agency for toxic substances and disease registry. September of 2012. Public Health Service, US Department of Health and Human Services.
- Basha, A.M., Yasovardhan, N., Satyanarayana, S.V., Reddy, G.V.S., and Kumar, A.V. 2014. Trace metals in vegetables and fruits cultivated around the surroundings of *Tummalapalle uranium*

- mining site. Andhra Pradesh, India. *Toxicology Reports* 1: 505-512.
- Bavarnegin, E., Sadremomtaz, A., Khalafi, H., Kasesaz, Y., Golshanian, M., Ghods, H., Ezzati, A., Keyvani, M., and Haddadi, M. 2016. Measurement and simulation of the TRR BNCT beam parameters. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (Section A)* 830: 53-58.
- Bourliva, A., Kantiranis, N., Papadopoulou, L., Aidona, E., Christophoridis, C., Kollias, P., Evgenakis, M., and Fytianos, K. 2018. Seasonal and spatial variations of magnetic susceptibility and potentially toxic elements (PTEs) in road dusts of Thessaloniki city, Greece: A one-year monitoring period. *Science of the Total Environment* 639: 417-427.
- Buchanan, B.B., Gruissem, W., and Jones, R.L. 2015. *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*, 2nd Edition. John Wiley and Sons.
- Chatterjee, J., and Chatterjee, C. 2000. Phytotoxicity of cobalt, chromium and copper in cauliflower. *Environmental pollution* 109: 69-74.
- D'Angelo, J.A., Martinez, L.D., Resnizky, S., Perino, E., and Marchevsky, E.J. 2001. Determination of eight lanthanides in apatites by ICP-AES, XRF, and NAA. *Journal of Trace and Microprobe Techniques* 19: 79-90.
- Das, H., Mitra, A.K., Sengupta, P., Hossain, A., Islam, F., and Rabbani, G. 2004. Arsenic concentrations in rice, vegetables, and fish in Bangladesh: a preliminary study. *Environment International* 30: 383-387.
- Esmaili, N., Ebrahimzadeh, H., Abdi, K., Mirmasoumi, M., Lamei, N., and Shamami, M.A. 2013. Determination of metal content in *Crocus sativus* L. corms in dormancy and waking stages. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research* 12: 31-36.
- Fernández, J.A. 2007. Genetic resources of saffron and allies (*Crocus* spp.). *Acta Horticulturae* 739: 167-185.
- Frassinetti, S., Bronzetti, G.L., Caltavuturo, L., Cini, M., and Della Croce, C. 2006. The role of zinc in life: a review. *Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology* 25: 597-610.
- Funari, V., Braga, R., Bokhari, S.N.H., Dinelli, E., and Meisel, T. 2015. Solid residues from Italian municipal solid waste incinerators: a source for "critical" raw materials. *Waste Management* 45: 206-216.
- Gitet, H., Hilawie, M., Muuz, M., Weldegebriel, Y., Gebremichael, D., and Gebremedhin, D. 2016. Bioaccumulation of heavy metals in crop plants grown near Almeda Textile Factory, Adwa, Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment* 188 (500): 1-8.
- Gondek, K. 2008. Chromium bioaccumulation from composts and vermicomposts based on tannery sludges. *Journal of Central European Agriculture* 9: 129-140.
- Grygo-Szymanko, E., Tobiasz, A., Walas, S., 2016. Speciation analysis and fractionation of manganese: A review. *Trends in Analytical Chemistry* 80: 112-124.
- Hassan-Beygi, S.R., Ghanbarian, D., Kianmehr, M.H., and Farahmand, M. 2010. Some physical properties of saffron crocus corm. *Cercetări Agronomice în Moldova* 141: 17-29.
- Hatcher, L. 2003. *Step-by-Step Basic Statistics Using SAS: student guide*. SAS Institute, New York.
- Imtiaz, M., Mushtaq, M.A., Nawaz, M.A., Ashraf, M., Rizwan, M.S., Mehmood, S., Aziz, O., Rizwan, M., Virk, M.S., and

- Shakeel, Q. 2018. Physiological and anthocyanin biosynthesis genes response induced by vanadium stress in mustard genotypes with distinct photosynthetic activity. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 62: 20-29.
- Jackson, S. 2015. *Research Methods and Statistics: A Critical Thinking Approach*. Cengage Learning, Boston, USA.
- Jorfi, S., Maleki, R., Jaafarzadeh, N., and Ahmadi, M. 2017. Pollution load index for heavy metals in Mian-Ab plain soil, Khuzestan, Iran. *Data In Brief* 15: 584-590.
- Khorasanipour, M., and Barvar, A. 2019. Investigation on the distribution of potentially toxic elements and their environmental significance in the greenhouse cultivated soils of Jiroft township, Kerman province. *Geosciences* 28: 119-128.
- Kim, J.H., Gibb, H.J., and Howe, P.D. 2006. *Cobalt and Inorganic Cobalt Compounds*. Concise International Chemical Assessment Document 69. World Health Organization (WHO), Stuttgart, Germany.
- Klix, A., Arbeiter, F., Majerle, M., Qiu, Y., and Štefánik, M. 2019. Measurement of neutron fluence in the High-Flux test module of the early neutron source by neutron activation. *Fusion Engineering and Design* 146: 1258-1261.
- Koocheki, A., Moghaddam, P.R., and Seyyedi, S.M. 2019. Saffron-pumpkin/watermelon: A clean and sustainable strategy for increasing economic land equivalent ratio under limited irrigation. *Journal of Cleaner Production* 208: 1327-1338.
- Koocheki, A., and Seyyedi, S.M. 2015. Phonological stages and formation of replacement corms of saffron (*Crocus sativus* L.) during growing period. *Journal of Saffron Research* 3: 134-154.
- Kowalska, J.B., Mazurek, R., Gąsiorek, M., and Zaleski, T., 2018. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination—A review. *Environmental Geochemistry and Health* 40: 2395-2420.
- Larsson, M.A. 2014. *Vanadium in soils*. Doctoral Thesis, Department of Soil and Environment, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- Lashkari, A., Khalafi, H., Mirvakili, S.M., and Foroghi, S. 2012. Neutronic analysis for Tehran Research Reactor mixed-core. *Progress in Nuclear Energy* 60: 31-37.
- Latif, A., Bilal, M., Asghar, W., Azeem, M., and Ahmad, M. 2018. Heavy Metal Accumulation in Vegetables and Assessment of their Potential Health Risk. *Journal of Environmental Analytical Chemistry* 5: 234.
- Li, H.F., Gray, C., Mico, C., Zhao, F.J., and McGrath, S.P. 2009. Phytotoxicity and bioavailability of cobalt to plants in a range of soils. *Chemosphere* 75: 979-986.
- Loveland, W.D., Morrissey, D.J., and Seaborg, G.T. 2017. *Modern Nuclear Chemistry*. John Wiley and Sons. Hoboken, New Jersey, USA.
- Malinowska, E., Jankowski, K., Wiśniewska-Kadżajan, B., Sosnowski, J., Kolczarek, R., Jankowska, J., and Ciepiela, G.A. 2015. Content of zinc and copper in selected plants growing along a motorway. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 95: 638-643.
- McGrath, D., Fleming, G.A., and Culleton, N. 2008. *Trace Elements in Irish Grassland*. Trace elements and heavy metals in Irish soils. Agriculture and Food Development Authority (Teagasc), Wexford, Ireland
- McKenna, E., Thompson, K.A., Taylor-Edmonds, L., McCurry, D.L., and

- Hanigan, D. 2020. Summation of disinfection by-product CHO cell relative toxicity indices: sampling bias, uncertainty, and a path forward. *Environmental Science: Processes and Impacts* 22: 708-713.
- Metali, F., Salim, K.A., Tennakoon, K., and Burslem, D.F. 2015. Controls on foliar nutrient and aluminium concentrations in a tropical tree flora: phylogeny, soil chemistry and interactions among elements. *New Phytologist* 205: 280-292.
- Millaleo, R., Reyes-Díaz, M., Ivanov, A.G., Mora, M.L., and Alberdi, M. 2010. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 10: 470-481.
- Mirosławski, J., and Paukszto, A. 2018. Determination of the cadmium, chromium, nickel, and lead ions relays in selected polish medicinal plants and their infusion. *Biological Trace Element Research* 182: 147-151.
- Moratalla-López, N., Bagur, M.J., Lorenzo, C., Salinas, M., and Alonso, G.L. 2019. Bioactivity and Bioavailability of the Major Metabolites of *Crocus sativus* L. Flower. *Molecules* 24: 2827-2851.
- Nagajyoti, P.C., Lee, K.D., and Sreekanth, T. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters* 8: 199-216.
- Noulas, C., Tziouvalekas, M., and Karyotis, T. 2018. Zinc in soils, water and food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 49: 252-260.
- Proshad, R., Ahmed, S., Rahman, M., and Kumar, T. 2017. Apportionment of hazardous elements in agricultural soils around the vicinity of brick kiln in Bangladesh. *Journal of Environmental and Analytical Toxicology* 7: 2161-0525.1000439.
- Rana, M.N., Tangpong, J., and Rahman, M.M. 2018. Toxicodynamics of lead, cadmium, mercury and arsenic-induced kidney toxicity and treatment strategy: a mini review. *Toxicology Reports* 5: 704-713.
- Repula, C.M.M., Quináia, S.P., de Campos, B.K., Ganzarolli, E.M., and Lopes, M.C. 2012. Accumulation of chromium and lead in bryophytes and pteridophytes in a stream affected by tannery wastewater. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 88: 84-88.
- Rubin, A. 2013. *Statistics for Evidence-Based Practice and Evaluation*. Cengage Learning, Canada.
- Salahinejad, M., and Aflaki, F. 2010. Toxic and essential mineral elements content of black tea leaves and their tea infusions consumed in Iran. *Biological Trace Element Research* 134: 109-117.
- Shao, J.F., Yamaji, N., Shen, R.F., and Ma, J.F. 2017. The key to Mn homeostasis in plants: regulation of Mn transporters. *Trends in Plant Science* 22: 215-224.
- Stern, L.D. 2010. *A Visual Approach to Spss for Windows: a Guide to SPSS 17.0*. Allyn and Bacon, Toronto.
- Temperini, O., Rea, R., Temperini, A., Colla, G., and Roupheal, Y. 2009. Evaluation of saffron (*Crocus sativus* L.) production in Italy: Effects of the age of saffron fields and plant density. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 7: 19-23.
- Tousi, E.T., Aboarrah, A., Bauk, S., Hashim, R., and Jaafar, M.S. 2018. Measurement of percentage depth dose and half value layer of the *Rhizophora* spp. particleboard bonded by *Eremurus* spp. to 60, 80 and 100 kVp Diagnostic X-rays. *MAPAN* 33, 1-8.

- Tousi, E.T., Bauk, S., Hashim, R., Jaafar, M.S., Abuarra, A., Aldroobi, K.S.A., and Al-Jarrah, A.M. 2014a. Measurement of mass attenuation coefficients of *Eremurus-Rhizophora* spp. particleboards for X-ray in the 16.63–25.30 keV energy range. *Radiation Physics and Chemistry* 103: 119-125.
- Tousi, E.T., Firoozabadi, M.M., and Shiva, M. 2016. Determination of the thorium potential in Shah-Kooh area in Iran by NAA and comparison with the results of ICP and XRF techniques. *Measurement* 90: 20-24.
- Tousi, E.T., Hashim, R., Bauk, S., Jaafar, M.S., Abuarra, A.M.H., and Ababneh, B. 2014b. Some properties of particleboards produced from *Rhizophora* spp. as a tissue-equivalent phantom material bonded with *Eremurus* spp. *Measurement* 54: 14-21.
- Tousi, E.T., Hashim, R., Bauk, S., Jaafar, M.S., Abuarra, A.M.H., Al-Jarrah, A.M., Ababneh, B., Tousi, A.T., and Aldroobi, K.S.A. 2015. Characterization of the rhizophora particleboard as a tissue-equivalent phantom material bonded with bio-Based adhesive. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 17: 305-318.
- Tousi, E.T., Kardani, H., Firuzabadi, M.M., Jaafar, M.S., Aljarrah, A.M., Ghasemi, L., Khaniabadi, P.M., and Amin, Y.A. 2014c. Shielding design for an am-be neutron source using MCNP4C code and real dosimetry. *Caspian Journal of Applied Sciences Research* 3: 13-22.
- Vachirapatama, N., Jirakiattiku, Y., Dicoski, G.W., Townsend, A.T., and Haddad, P.R. 2011. Effect of vanadium on plant growth and its accumulation in plant tissues. *Songklanakarin Journal of Science and Technology* 33: 255-261.
- Vodyanitskii, Y.N. 2016. Standards for the contents of heavy metals in soils of some states. *Annals of Agrarian Science* 14: 257-263.
- Weise, H.P., Görner, W., and Hedrich, M. 2001. Determination of elements by nuclear analytical methods. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* 369: 8-14.
- WHO, 2000. Air quality guidelines for Europe. World Health Organization.
- WHO, 2011. Joint FAO/WHO Food Standards Programme Codex Committee on Contaminants in Food. World Health Organization, The Netherlands.
- WHO/FAO, 2001. Codex Committee on Food Additives and Contaminants (CCFAC). Joint FAO/WHO Food Standards programme, ALINORM 01/12 A.
- Yadav, S. 2010. Heavy metals toxicity in plants: an overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany* 76: 167-179.
- Yang, J., Wang, M., Jia, Y., Gou, M., and Zeyer, J. 2017. Toxicity of vanadium in soil on soybean at different growth stages. *Environmental Pollution* 231: 48-58.
- Zanão Júnior, L.A., Fontes, R.L.F., Neves, J.C.L., Korndörfer, G.H., and Ávila, V.T.d. 2010. Rice grown in nutrient solution with doses of manganese and silicon. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34: 1629-1639.

## Evaluation of Levels of Some Trace Metals in *Crocus sativus* L. and Their Transfer Trend from Soil to Saffron by Using Neutron Activation Analysis

Ehsan Taghizadeh Tousi<sup>1\*</sup>

Submitted: 4 December 2019

Accepted: 9 June 2020

Taghizadeh Tousi, E. 2020. Evaluation of Levels of Some Trace Metals in *Crocus sativus* L. and Their Transfer Trend from Soil to Saffron by Using Neutron Activation Analysis. Saffron Agronomy & Technology, 8(3): 377-397.

### Abstract

In this research, concentrations of vanadium, chromium, manganese, cobalt, zinc, and arsenic were measured in saffron and saffron farm soil in two counties of Torbat Heydariyeh and Zaveh as two main centers of saffron production in the world using the neutron activation analysis method. The soil chromium and cobalt concentrations of all farms were found to be much higher than the WHO level and the values of vanadium, manganese, zinc, and arsenic were lower than the admissible level. The deficiency of essential elements for plant growth in the soil was not found. Two statistical analyses were used to evaluate the results of neutron activation analysis. The results of the paired t-test showed that the concentrations of vanadium, manganese, chromium, and cobalt were similar in different soil depths, which indicated distribution of these elements in the soil to be uniform. Also, only the zinc concentrations in the corm and its surrounding soil were statistically significant, which could indicate a strong movement of this element from soil to saffron. This test also showed that the distribution of the elements was uniform in the shoots. The correlation coefficients show that the uptake of cobalt and manganese by the saffron may decrease by increasing concentration of zinc in the soil. In addition, based on the contamination index and geo-accumulation, all soils in Torbat Heydarieh and Zaveh are extremely contaminated by chromium. In the adjacent areas in these two counties (south of Torbat Heydarieh and the west of Zaveh), and the central zone of Zaveh, the contamination levels of arsenic in the soil were found to be moderate and very high, respectively. Saffron crops were estimated uncontaminated in all farms, except in eastern Zaveh and south of Torbat Heydarieh that were contaminated by chrome. According to both indices of load and degree of contamination, the soil of all saffron farms were found to be highly contaminated. Soil contamination was evaluated to be extreme by the using both pollution load Index (PLI) and contamination degree (CD). In addition, saffron threads were found to be totally uncontaminated (except in the south of Torbat Heydarieh, where the crop was moderately polluted), according to PLI and CD.

**Keywords:** Contamination Indices, Neutron Activation Analysis, Saffron, Trace element

---

1 - University of Torbat Heydarieh, Saffron Institute, University of Torbate Heydarieh, Torbat Heydarieh, Iran

(\* - Corresponding author Email: e.taghizadeh@torbath.ac.ir)

DOI: 10.22048/JSAT.2020.210456.1368