



The application of remote sensing in modeling the effects of distance from the road on the accumulation of heavy metals in leaves and soil of quercus branti species Case study: Kakareza Forest, Khorramabad, Lorestan

Nastaran Nazariani¹, Asghar Fallah^{*2}, Hava Hasanvand³, Hassan Akbari⁴

Date of receive:

2023.07.03

Date of last review:

2023.10.18

Date of accept:

2023.10.30

Date of online publication:

2024.02.15

Keywords:

Bio indicator,
Leave,
Modeling,
Nonparametric methods,
Quercus branti,
Sentinel-2,
Soil,
Traffic

Extended Abstract

Introduction

The traditional method of chemical analysis has high accuracy and precision. However, it is time-consuming and laborious, and it is not possible to obtain continuous information about the pollutant status over a large area. Therefore, there is an urgent need for a reliable and environmentally friendly method to quickly identify and investigate the distribution of heavy metals in soil and thus identify suspected contaminated areas (Scheuber & Köhl, 2003:33). Remote sensing is one of the ways that can provide a cost-effective and quick solution to investigate the distribution of heavy metals on a large scale using spectroscopic techniques (Bi et al., 2009:16). Habibi et al. (2023:4) also measured and evaluated the concentration of heavy metals in the aerial parts and soil of the tree species of Bandar Abbas city and also identified the species that has the highest potential for absorbing heavy metals. The results showed that the pattern of heavy metals in soil and leaves of tree species was Mn>Zn>Pb>Cd. (Nikolaevich, 2023:30) they addressed the modeling of heavy metal pollution in Central Russia based on satellite images and machine learning. Al, Fe, and Sb contamination were predicted for 3000 and 12100 grid nodes in an area of 500 km² for the Central Russian region for 2019 and 2020. Estimating the amount of this pollution requires time and high cost. Considering the traffic on the Aleshtar -Khorramabad highway near Kakareza forests and the effect of heavy metal concentration in the soil and leaves of the oak species Iranian oak is a serious threat to this forest. Therefore, it is necessary to study and discuss pollutants and their effects on the environmental cycle. In this regard, considering the cost and time-consuming nature of traditional methods and since remote sensing methods are a suitable complement to traditional methods; the aim of the present research is to use remote sensing techniques and spectral analyses to evaluate and model the accumulation of heavy metals in Iranian oak species. ... ▶ Page 180

1- Postdoctoral Researcher of Forestry, Department of Forestry, Faculty of Forestry, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran, Nazariani69@yahoo.com

2- (*Corresponding author) Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran, Fallaha2007@yahoo.com

3- PhD student in Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran, havaa.hasanvand93@gmail.com

4- Associate Professor Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran, hassan_akbarivas@yahoo.com

Materials and Methods

The present study is located on the road of Aleshtar-Khorramabad, 20 kilometers northwest of Khorramabad. For this purpose, five transects were created at distances adjacent to the road, 500 and 1000 meters on both sides of the road, and 10 x 10 m sample pieces were planted. Inside the sample plots, 30 soil samples were randomly collected and 30 leaf samples were collected from trees in all directions of the crown. To extract heavy metals from soil samples and plant samples, the acid digestion method was used and the physical characteristics of the soil were measured using standard methods. After preparing the samples, the concentration of Pb, Cu, and zinc heavy metals in soil and leaves was measured and the index of biological concentration of heavy metals from soil to leaves was calculated. Then the relationship between the concentration of heavy elements measured and the reflectance in different bands or band ratios at the corresponding sampling points was obtained. Non-parametric methods and generalized multiple linear regression models were used in order to model quantitative variables and spectral values corresponding to sample parts in satellite data. ArcGIS software was used to implement sample parts on the image, ENVI software was used for image processing, and STATISTICA software was used for modeling.

Results and Discussion

Cu and Pb in Iranian oak leaves had significant differences at different distances at the 0.05 level, but Cu did not have significant differences at different distances at the 0.05 level. Cu and Pb did not have significant differences in different soil intervals at the 0.05 level, but Cu had significant differences in different soil intervals at the 0.05 level. The bioconcentration factor was obtained as (0.2, 0.5, 0.2) mg/kg. The study of modeling of non-parametric methods using Sentinel-2 satellite data showed that the highest explanatory coefficient values (0.85, 0.88, and 0.97) were obtained for the three metals Cu, Pb, and Cu, respectively. The artificial neural network (ANN) algorithm obtained the highest accuracy. Also, according to the results of the random forest algorithm, for the three mentioned metals, PSRI, HMSSI, and PSRI indices are the most important in modeling.

Based on the findings, the concentration values of Cu and zinc were significantly different at different distances, but the Cu values were not significantly different at different

distances. In this regard, Mansour concluded in 2014 that there is a significant difference between the concentration of Cu and zinc in the leaves of the species, which can be attributed to traffic density and human activities, and the high amount of zinc metal in this study is the wear of car tires and stated that the concentration of Cu is caused by the production of greenhouse gases and the use of vehicles using Cu gasoline. Based on the findings, the values of Cu and zinc concentrations at different distances did not have significant differences, but the Cu values had significant differences at different distances. Sources of input of Cu element to the soil are urban, industrial, and agricultural waste, fertilizers, and chemicals that add it to the soil through liquid, solid, or mineral fertilizers. These findings are with the results of some researchers including Wu and colleagues (2010:38), Botsou et al. (2016:17) are consistent. Based on the findings obtained from the calculation of the bioconcentration index and their comparison with the classification proposed by Ma et al. (2001:25) for Iranian oak species plants in relation to Cu, zinc, and Cu metals from soil to leaves, it acts as an accumulating plant. In accordance with the results of this research, in the study of Khodakarmi et al. (2009:15), Iranian oak was included in the category of superabsorbent plants in relation to the accumulation of Cu pollutants, which has a high capacity in terms of root absorption. Also, Madejón et al. (2006:25) stated that oak leaves are more resistant than olive leaves. The concentrations of elements in leaves and fruits decrease with time and the risk of toxicity in the food web is reduced. The review and comparison of five algorithms showed that (ANN) the highest explanatory coefficient values (0.85, 0.88, and 0.97) were obtained for three metals, Cu, Zn, and Cu, respectively. Considering the importance of the PSRI synthetic band in increasing the accuracy of modeling with satellite images and the influence of the visible and near-infrared bands, the amount of reflection measured by the spectroscopic method showed that with the increase in the concentration of heavy elements, the amount of reflection in the visible and infrared range decreases (Liu et al., 2011:24).

Conclusion

The results showed that Sentinel-2 images along with artificial intelligence techniques have a relatively good ability to model the level of biological pollution index in the region. In line with the obtained results, it is suggested that the Iranian oak species is used to reduce pollution on highways because it accumulates heavy metals.



کاربرد سنجش از دور در مدل سازی اثرهای فاصله از جاده بر تجمع فلزات سنگین در برگ و خاک گونه بلوط ایرانی - مطالعه موردی: جنگل کاکارضا خرم آباد، لرستان

نسترن نظریانی^۱، اصغر فلاح^۲، حوا حسنونند^۳، حسن اکبری^۴

چکیده
آلودگی فلزات سنگین چالش بزرگی برای محیط زیست است. با افزایش سطح آلودگی، روش های پایش سنتی نمی توانند به سرعت اطلاعاتی در مورد آلودگی مناطق بزرگ به دست دهند. با توجه به پرهزینه و زمان بر بودن روش های آزمایشگاهی استفاده از تصاویر ماهواره ای و روش های سنجش از دور با در نظر گرفتن دقت کافی می توانند مکمل مناسبی در این زمینه باشند. پژوهش حاضر با هدف بررسی آلودگی فلزات سنگین سرب، روی و مس در خاک و برگ جنگل های بلوط ایرانی واقع در جنگل کاکارضا، استان لرستان با به کارگیری فناوری سنجش از دور و تصاویر ماهواره Sentinel-2 به کمک شاخص های آلودگی (HMSI، NDVI، SAVI و PSRI) انجام شد. نتایج پژوهش نشان داد که غلظت فلزات سنگین در خاک با افزایش فاصله از جاده کاهش می یابد. بین مواد آلی و مس خاک در سطح پنج درصد همبستگی منفی معنی داری وجود دارد. مقادیر غلظت فلزات سنگین در برگ درختان بلوط ایرانی از مقادیر استاندارد جهانی کمتر است. در بخش نتایج شاخص تجمع زیستی نیز میزان فاکتور تجمع زیستی به ترتیب برای سرب، روی و مس (۰/۲، ۰/۰، ۰/۵/۲) میلی گرم بر کیلوگرم حاصل شد. در مقایسه پنج الگوریتم ناپارامتریک GAM، ANN، RF، SVM و KNN، مدل (ANN) به ترتیب برای سه فلز Pb، Zn و Cu بالاترین مقادیر ضریب تبیین (۰/۸۵، ۰/۸۸ و ۰/۹۷) به دست آمد. به طور کلی نتایج نشان داد تصاویر Sentinel-2 به همراه مدل شبکه عصبی مصنوعی قابلیت خوبی در مدل سازی میزان شاخص تجمع زیستی دارند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۲
تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۱/۲۶
واژه های کلیدی: شاخص زیستی؛ برگ؛ مدل سازی؛ شاخص های ناپارامتریک؛ بلوط ایرانی؛ سنتینل ۲؛ خاک، ترافیک

۱- پژوهشگر پسادکتری جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، Nazariani69@yahoo.com
۲- استاد گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران، (نویسنده مسئول) Fallaha2007@yahoo.com
۳- دانشجوی دکتری جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، havaa.hasanvand93@gmail.com
۴- دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران، hassan_akbarivas@yahoo.com

مقدمه

ذرات معلق و ترکیبات آلی غیرفرار را دارد. علاوه بر این درختان دارای پراکنش بالایی بوده و دسترسی به برگ‌های آن‌ها راحت است؛ از این رو نمونه‌گیری از برگ‌ها برای این کار مناسب به نظر می‌رسد (Scheuber and Köhl, 2003:33). فلزات سنگین و هیدروکربن‌های نفتی رایج‌ترین آلاینده‌های خاک هستند. فلزات سنگینی که وارد زیست سپهر می‌شوند در معرض فرآیندهای تخریب قرار نمی‌گیرند، که به‌ویژه به دلیل تجمع پی در پی محتوای آن‌ها در طول زمان، سمیت آن‌ها و جذب آسان آن‌ها توسط گیاهان خطرناک است. مضر بودن محتوای بیش از حد فلزات سنگین یک ویژگی مشترک در زمینه تأثیر آن‌ها بر محیط زیست و انسان است (et al., 2020:13 Ahmed). بنابراین بررسی وجود فلزات سنگین در سیستم‌های مختلف زیستی اهمیت دارد. فلزات سنگین از طریق سیستم‌های ریشه به گیاهان نفوذ می‌یابند و غلظت بالای غیرمعمول از فلزات سنگین تأثیر بدی در رشد گیاهان خواهند داشت. گیاهان می‌توانند به‌عنوان شاخص سلامت بوم‌سازگان استفاده شوند. در بوم‌سازگان طبیعت، گیاهان زیادی به‌عنوان تجمع‌کننده فلزات سنگین عمل می‌کنند. اما حتی غلظت‌های خیلی بالایی از فلزات سنگین در خاک وجود دارد که این غلظت در گیاهان می‌تواند خیلی پایین باشد. با قرار گرفتن در پایین زنجیرهای طبیعی غذا واحدهای تجمع‌کننده فلز، به‌طور مستقیم و غیرمستقیم مسئول جذب غذایی فلزات سنگین توسط حیوانات و انسان‌ها هستند (Xie, 1998:40). سرب به‌عنوان عنصر غیرضروری هیچ نقش زیستی شناخته‌شده‌ای در فرآیندهای زیستی ندارد و حتی در مقادیر بسیار اندک نیز برای سلامتی جانداران خطرناک و بسیار سمی است. آسب به مغز، کلیه‌ها، شش، مغز استخوان، تغییر در نرخ زاد و ولد، میزان رشد، افزایش فشار خون، ناباروری مردان، سقط جنین، کوتاه شدن دوران بارداری، ناتوانی در یادگیری و اغما از آثار مسمومیت با سرب است (Debnath et al., 2019:18). از آنجایی که برگ‌ها غلظت‌های بیشتری از سرب را نسبت به ریشه‌ها دارند، همچنین سرب در لایه‌های سطحی که به‌صورت اتمسفری رسوب یافته

فلزات سنگین از دو منبع اصلی و منابع طبیعی هوازدگی سنگ‌ها و کانی‌های معدنی و یا در نتیجه فعالیت‌های انسان مثل استفاده از پساب‌های شهری، زباله‌ها، زهکش حاصل از نواحی کشاورزی و صنعتی است (Xie, 1998:40) و همچنین معدن‌کاری، صنایع مختلف، حمل و نقل جاده‌ای، کودهای معدنی و شیمیایی کشاورزی، لجن فاضلاب و پسماندهای صنعتی سرچشمه می‌گیرند (Kumar et al., 2019:22). در مطالعه فلزات سنگین، اطلاع از مقدار آن‌ها در محیط خاک، آب و گیاه، ویژگی‌های شیمیایی و قابلیت انتقال آن‌ها در خاک و همچنین وجود آن‌ها در چرخه غذایی، به‌منظور حفظ سلامت انسان‌ها ضروری است. جذب فلزات سنگین در گیاهان همبستگی زیادی با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دارد (کشاورز شکری، ۱۳۸۳: ۱۰). تخریب و آلودگی محیط زیست، ثمره‌ی جوامع صنعتی و یکی از ره‌آوردهای صنعتی شدن اجتماعات بشری است. گیاهان و درختان نقش کلیدی و مهمی در ایجاد محیط‌های سالم برای افراد دارند و می‌توانند اکسیژن را برای افراد به‌منظور تنفس فراهم سازند. گونه‌های گیاهی به‌ویژه درختان و درختچه‌ها نقش مهمی در ترسیب و به دام انداختن بسیاری از گازها، آلاینده‌های هوا و ذرات گرد و غبار موجود در هوا دارند؛ بنابراین کیفیت زندگی شهری را نیز بهبود می‌بخشند (Patel et al., 2015:31). هرچند درختان و گیاهان از عوامل اصلی مقابله با آلودگی هوا محسوب می‌شوند، ولی چنانچه مقدار این آلودگی در هوا افزایش یابد، گیاهان به‌عنوان موجودات زنده از آسیب مصون نمی‌مانند. درختان منبع مهمی برای به دام انداختن و جذب بسیاری از ذرات معلق در هوا و آلاینده‌های موجود در هوا هستند و برگ‌ها به‌عنوان یک نشانگر خوب در برابر آلاینده‌های هوا هستند (et al., 2019:22 Kumar). درختان پهن‌برگ نقش یک صافی طبیعی را برای گرد و غبار موجود در هوا بازی می‌کنند. برگ‌های درختان دارای سطوح زیادی در واحد وزن بوده و لایه مومی سطح برگ قابلیت جذب و نگهداری گرد و غبار،

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۳۳)

کاربرد سنجش از دور در مدل سازی اثرهای فاصله از جاده بر تجمع فلزات سنگین در برگ و ... / ۱۸۳

(Köhl, 2003). سنجش از دور یکی از راه‌هایی است که می‌تواند راه‌حلی مقرون به‌صرفه و سریع برای بررسی توزیع فلزات سنگین در مقیاسی وسیع با استفاده از فنون طیف‌سنجی ارائه نماید (Bi et al., 2009:16). امواج مرئی و مادون قرمز بخشی از امواج الکترومغناطیس مورد استفاده در سنجش از دور هستند که برای تعیین ویژگی‌های کیفی و کمی عوارض مانند پارامترهای مربوط به خاک، آب و گیاه استفاده می‌شوند. همچنین برای تعیین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مختلف خاک مانند میزان رطوبت، مواد آلی و معدنی کاربرد دارند که می‌توانند به‌صورت مؤثری در بررسی آلودگی خاک به‌وسیله فلزات سنگین نیز سودمند واقع شوند (Deng and Wong, 2007:19).

طی مطالعه‌ای توسط انصاری و همکاران (۱۴۰۰:۱) در راستای برآورد غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در خاک منطقه لنجان با استفاده از اندازه‌گیری زمینی و تصاویر سنجنده OLI ماهواره Landsat-8 نتایج نشان داد بین غلظت سرب و باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک همبستگی منفی وجود دارد ولی بین غلظت کادمیوم و ارزش رقومی باندها همبستگی مشاهده نشد.

حبیبی و همکاران (۱۴۰۱:۵) نیز در سنجش و ارزیابی غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی و خاک بستر گونه‌های درختی شهر بندرعباس بیان کردند الگوی فلزات سنگین در خاک و برگ گونه‌های درختی به‌صورت $Mn > Zn > Pb > Cd$ بوده است. غلظت فلزات منگنز و سرب در خاک گونه‌های گیاهی متفاوت بود و اختلاف آن‌ها در سطح ۹۵ درصد معنادار بود، اما برای غلظت کادمیوم و روی در خاک گونه‌های درختی اختلافی مشاهده نشد. در اندام هوایی، غلظت سرب، منگنز و روی تفاوتی مشاهده نشد و اختلاف آن‌ها در سطح ۹۵ درصد معنادار نبود؛ اما غلظت کادمیوم در اندام هوایی گونه‌ها (برگ درختان)، متفاوت بوده و اختلاف بین گونه‌ها در سطح ۹۵ درصد معنادار بود.

(Liao et al., 2009: 23) طی پژوهشی به تعیین انتشار و

تغییرات فلزات سنگین (به‌ویژه کادمیوم، مس و روی) تحت

مرتبط با سرب‌بی که در خاک‌ها و گیاهان شسته نشده است؛ در نتیجه باعث رسوب اتمسفری در برگ‌ها شده است (et al., 2020:28 Merzlyak). روی به‌عنوان یک فلز سنگین ضروری در مقادیر اندک برای بقا و فرآیندهای زیستی جانداران لازم و بی‌خطر است، اما در مقادیر زیاد می‌تواند ایجاد مسمومیت کند. از علائم مسمومیت با املاح فلز روی می‌توان به ضعف و ناتوانی، کاهش جذب اکسیژن، افزایش ضربان قلب، بروز اختلال در کبد و کلیه و فیروز ریه اشاره کرد (محمدی و همکاران، ۲۰۱۸). به‌منظور حفاظت زیست‌بوم‌ها از آلودگی فلزات سمی، بررسی آلودگی خاک‌ها و گیاهان حاشیه جاده‌ها به این فلزات بسیار ضروری است اگرچه قوانین و مقرراتی درخصوص ممنوعیت استفاده از سوخت‌های غیراستاندارد اعمال شده ولی به‌دلیل افزایش بار ترافیکی غلظت عناصر سنگین حاشیه جاده‌ها و بزرگراه‌ها در حال افزایش است (Debnath et al., 2019:18). در عمل، تخمین توزیع فضایی فلزات سنگین خاک در مقیاس بزرگ از طریق داده‌های زمینی و روش‌های تخمین سنتی دشوار است. ناهمگونی فضایی فلزات سنگین خاک بسته به فعالیت‌های مختلف انسانی، عوامل توپوگرافی و کانی‌های زیرزمینی قابل توجه است (کشاورز شکری، ۱۳۸۳: ۱۰). فلزات سنگین در خاک‌های کنار جاده از گازهای گلخانه‌ای و سائیدگی در قطعات خودرو حاصل می‌شوند (Wang et al., 2022: 36). علاوه بر این، جمع‌آوری نمونه خاک در مقیاس بزرگ و آزمایش اجزای خاک اغلب بیش از حد گران است. ناهمگونی مکانی نمونه‌ها و تعداد محدود نمونه‌های خاک منجر به آموزش ناکافی مدل و کاهش دقت روش‌های تخمین سنتی می‌شود (Tan et al., 2020:35). روش سنتی آنالیز شیمیایی دارای صحت و دقت بالایی است. با این وجود، زمان‌بر و پرهزینه است و نمی‌توان اطلاعات مستمری در مورد وضعیت آلاینده در یک منطقه بزرگ به‌دست آورد. بنابراین، نیاز مبرمی به روشی قابل اعتماد و سازگار با محیط زیست برای شناسایی و بررسی سریع توزیع فلزات سنگین در خاک و در نتیجه شناسایی مناطق مشکوک آلوده وجود دارد (Scheuber and 33).

عناصر سمی ذکر شده، به جز کبالت (Co)، در لیست ۱۲۶ آلاینده اولویت‌دار آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده قرار دارند.

مرور منابع داخلی و خارجی نشان داد فلزات سنگین از آلاینده‌های مهم محیط زیستی هستند که از طریق ورود به زنجیره غذایی موجب بروز خطراتی برای انسان‌ها، گیاهان و میکروارگانیسم‌ها می‌شوند. در این زمینه سه فلز سنگین سرب، روی و مس بیشترین میزان ذخیره را در خاک و گیاهان نشان داده‌اند. برآورد میزان این آلودگی‌ها نیازمند زمان و هزینه بالایی است. از جمله مهم‌ترین چالش‌های محیط زیستی در غرب کشور می‌توان به تخریب مراتع، کاهش منابع آب، از بین رفتن تنوع حیات وحش، زباله‌ها و پسماندها، آلودگی هوا، فرسایش خاک، تخریب درختان جنگلی، استفاده از سموم و کودهای شیمیایی و مشکلات مدیریتی زیرساختی اشاره کرد (جمینی و همکاران، ۱۳۹۵: ۳). با توجه به جنبه حفاظتی جنگل‌های زاگرس مطالعه و شناخت کافی و همه جانبه از وضعیت رویشگاه‌های بلوط و شناسایی قابلیت آن‌ها برای برنامه‌ریزی بهتر، ضروری است. بلوط ایرانی (*Quercus branti*) اصلی‌ترین گونه درختی تشکیل‌دهنده جنگل‌های زاگرس است. احیاء و حفظ این جنگل‌ها با گونه بلوط که مهم‌ترین گونه چوبی تشکیل‌دهنده آن است؛ امری ضروری است. یکی از تهدیدات اصلی برای گونه‌های درختی حضور آلاینده‌هایی چون فلزات سنگین است. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه در بزرگراه انتخاب شده، غلظت این عناصر نسبت به عناصر دیگر بیشتر و در منطقه مورد نظر وجود داشته است. همچنین با توجه به ترافیک بالای بزرگراه الشتر - خرم‌آباد در نزدیکی جنگل‌های کاکارضا و تأثیر غلظت فلزات سنگین در خاک و برگ گونه بلوط که می‌تواند در اثر آلودگی‌های طبیعی و انسانی ایجاد شده باشد، بنابراین بررسی و بحث روی آلاینده‌ها و اثرات آن‌ها در چرخه محیط زیستی امری ضروری است. در این راستا با توجه به هزینه و زمان‌بر بودن روش‌های سنتی و از آن جا که روش‌های سنجش از دور مکمل مناسبی برای

شرایطی که خاک‌ها با فلزات سنگین آلوده شده و تحت تأثیر رسوب شیب‌سازی شده قرار می‌گیرند در استان هونان در جنوب چین، پرداختند. نتایج تجربی نشان داد که رسوب اسید به دلیل فرآیندهای شیمیایی پیچیده خاک، عمدتاً تبادل کاتیونی و انحلال جزئی مواد معدنی در pH کمتر از ۴/۲، منجر به آزادسازی فلزات سنگین در زیادی خاک می‌شود. آن‌ها اذعان داشتند زمانی که مقادیر pH در محدوده ۵/۱-۴/۲ باشد، غلظت فلزات سنگین با مقادیر pH مربوطه در محلول‌های تعادلی خاک رابطه منفی دارد.

(Nikolaevich 2023:30) به مدل‌سازی آلودگی فلزات سنگین روسیه مرکزی بر اساس تصاویر ماهواره‌ای و یادگیری ماشین، پرداخت. نتایج برای ۹ فلز سنگین با دقت کلی بیش از ۸۹ درصد نشان داده شد. آلودگی Al، Fe، Sb و برای ۳۰۰۰ و ۱۲۱۰۰ گره شبکه در یک منطقه ۵۰۰ کیلومتر مربعی برای منطقه روسیه مرکزی برای سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ پیش‌بینی شد.

براساس مطالعه (Petronio 2000:32) مشخص شد که سرب و آرسنیک بیشترین عناصر بالقوه سمی هستند. با این وجود، تحقیقات در مورد بقیه عناصر سمی را نمی‌توان نادیده گرفت؛ زیرا روندهای فزاینده‌ای را در طول زمان نشان می‌دهد. رایج‌ترین عناصر سمی یافت شده در مطالعات منتشر شده در علوم زیست محیطی و تحقیقات آلودگی عبارتند از آرسنیک (As)، کادمیوم (Cd)، کبالت (Co)، کروم (Cr)، مس (Cu)، جیوه (Hg)، نیکل (Ni)، سرب (Pb)، آنتیموان (Sb) و روی (Zn)؛ این عناصر معمولاً در غلظت‌های پایین‌تر از حد تشخیص در آب‌های طبیعی یافت می‌شوند (بیشتر اوقات به دلیل حساسیت بالای تکنیک‌های تحلیلی مدرن و قدرتمند)، در حالی که در برخی موارد شدید، به مقدار میلی‌گرم بر لیتر می‌رسند. با این حال، حتی در غلظت‌های بسیار پایین، می‌توانند برای موجودات زنده سمی باشند. به همین دلیل، سازمان بهداشت جهانی و چارچوب‌های قانونی کشورهای مختلف ارزش‌های حد مجاز نوشیدن را برای این عناصر سمی تعیین کرده‌اند. همه

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۱۳۸۵)

کاربرد سنجش از دور در مدل‌سازی اثرهای فاصله از جاده بر تجمع فلزات سنگین در برگ و ... / ۱۸۵

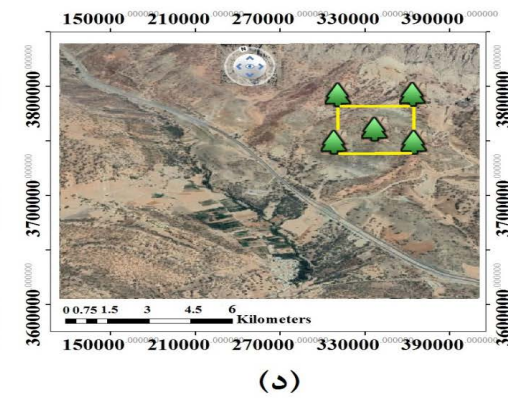
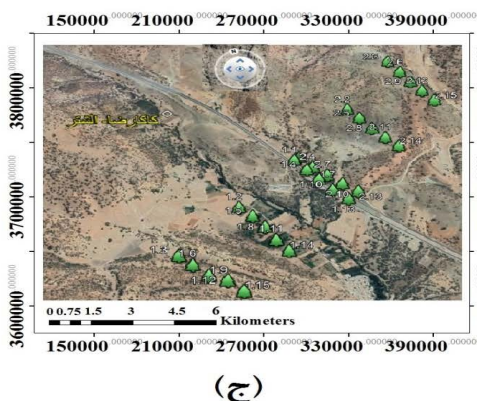
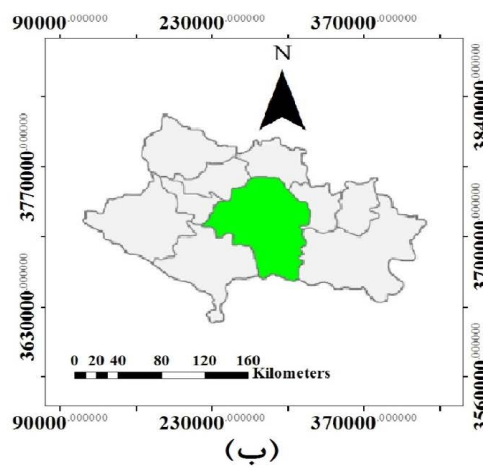
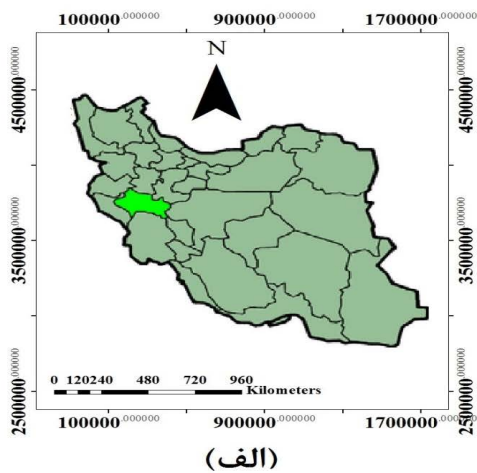
حدود ۱۶۰۰ متر است و تحت تأثیر اقلیم معتدل و خشک، بهار و تابستان معتدل و مطبوع و زمستان‌های سرد و خشک قرار دارد. خاک منطقه عمدتاً از نظر شیب از زمین‌شناسی و اقلیم منطقه تأثیر پذیرفته است. به علت وجود سنگ‌های مادری آهکی که بیشتر شکسته هستند از هر نظر متناسب بلوط ایرانی است؛ زیرا این خاک‌ها از نظر اسیدیته خاک، شوری، درصد گچ، درصد کربن آلی و فسفر قابل جذب و بافت خاک که لومی-رسی است، مشکلی ندارند. خاک‌های این منطقه نسبتاً تکامل یافته و جزء رده اینسپتی سول هستند. کاربری فعلی و آتی آن کشت آبی و باغ و میوه است. همچنین دارای شیب ملایم و پوشش جنگلی مناسبی است (طالبی و همکاران، ۱۳۸۵: ۹). نگاره ۱ موقعیت منطقه مورد پژوهش را نشان می‌دهد.

روش‌های سنتی است؛ با پیشرفت علم سنجش از دور در این زمینه به‌عنوان یک مکمل و همچنین به‌کارگیری روش‌های مدل‌سازی ناپارامتری چون شبکه عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی و ... هدف پژوهش پیش‌رو کاربرد فنون سنجش از دور و تحلیل‌های طیفی به‌منظور ارزیابی و مدل‌سازی تجمع فلزات سنگین و بررسی اثر فواصل مختلف جاده از گونه بلوط ایرانی بوده است.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های جغرافیایی منطقه

پژوهش حاضر در مسیر بزرگراه الشتر - خرم‌آباد در ۲۰ کیلومتری شمال غربی خرم‌آباد انجام شده است. این منطقه از شمال شرقی به کوه کلوپار و از جنوب غربی به کوه کمرسیاه محدود می‌شود. ارتفاع منطقه از سطح دریا در



نگاره ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

روش پژوهش

- نمونه برداری خاک

و پس از خشک شدن با آسیاب برقی به صورت پودر درآمد. سپس یک گرم از نمونه‌های خشک شده با ترکیب اسیدی (H_2O_2 و HNO_3) در دمای ۱۲۰-۱۱۵ درجه سلسیوس به مدت چهار ساعت در دستگاه هضم‌کننده هضم و برای سنجیدن فلزات سنگین از دستگاه جذب اتمی استفاده شد (Wang and Qin, 2007:37). پس از ساخت محلول مادر استوک و استاندارد نمک عناصر و کالیبره کردن دستگاه محتوی عناصر سرب، روی و مس در نمونه‌های مورد مطالعه اعم از خاک و برگ به ترتیب در طول موج‌های ۲۱۷/۰، ۲۱۳/۹ و ۲۱۵/۳ در سه تکرار قرائت شد. نرخ بازیابی عناصر نیز بین ۹۰ تا ۹۵ درصد در نظر گرفته شد.

به منظور نمونه برداری از خاک در بزرگراه مسافتی به طول ۴ کیلومتر در نظر گرفته شد. در این مسافت ۳۰ ایستگاه انتخاب و نمونه‌های خاک با فاصله‌های مجاور جاده، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری از هر دو طرف جاده از عمق ۲۰-۰ سانتی متری برداشت شد. برای نمونه برداری در محل هر نقطه یک قطعه نمونه ۱۰×۱۰ متر در نظر گرفته شد و درون آن نمونه‌ها از چهار گوشه و مرکز برداشت و با هم مخلوط شد تا یک نمونه مرکب خاک به دست آمد. به این ترتیب روی هم رفته از ۳۰ نقطه به روش مرکب نمونه برداری و پس از برداشت در کیسه‌های پلاستیکی برای انتقال به آزمایشگاه ذخیره شد (حسنوند و همکاران، ۱۳۹۷:۶).

- شاخص تجمع زیستی

شاخص تجمع زیستی (BAF) بیانگر فاکتور تجمع زیستی؛ Caerial tissues و Csoil به ترتیب بیانگر محتوی فلز در بافت هوایی گیاه (شاخسار) و خاک بر حسب mg/kg است (رابطه ۱) (Nadgórska-Socha et al., 2017:29).

- نمونه برداری گونه درختی

نمونه‌های برگ درخت بلوط از محل همان نقاط نمونه خاک، برداشت شد؛ به طوری که از تمامی قسمت‌های تاج درختان نمونه‌های برگ جمع‌آوری شد (حسنوند و همکاران، ۱۳۹۷:۶).

$$BAF = C_{\text{aerial tissues}} / C_{\text{soil}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

- روش آزمایشگاهی

- داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده
در این تحقیق از داده‌های سطح C1 ماهواره Sentinel-2 به منظور بررسی پراکنش فلزات سنگین سرب، مس و روی در منطقه استفاده شد. در سطح C1 تصحیحات رادیومتریک و هندسی (Ortho-Rectification) و (زمین مرجع کردن) انجام می‌شود. تصویر مورد نیاز از پایگاه اطلاعات سازمان زمین‌شناسی آمریکا، مربوط به زمان برداشت نمونه‌ها دریافت شد. ماهواره Sentinel-2 با سنجنده MSI دارای ۱۳ باند طیفی است که از میان آن‌ها چهار باند با توان تفکیک مکانی ۱۰ متر در محدوده مرئی و فرورسرخ نزدیک، شش باند با توان تفکیک مکانی ۲۰ متر و سه باند با توان تفکیک مکانی ۶۰ متر که اساساً برای تصحیحات اتمسفری

نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه ابتدا در دمای اتاق، خشک شد. نمونه‌های خاک خشک شده در دو مرحله، یک بار از الک ۲ میلی متری و بار دیگر با الک ۰/۱۴۹ میلی متر عبور داده شد. برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک شامل (pH، EC، بافت و مواد آلی خاک) با روش‌های استاندارد سنجیده شد. یک گرم از نمونه‌های خاک عبور داده شده از الک ۰/۱۴۹ با ترکیب (HNO_3 و $HClO_4$, HCL) خریداری شده از شرکت کیمیا تهران اسید در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به مدت شش ساعت در دستگاه هضم‌کننده قرار داده و برای سنجیدن فلزات سنگین از دستگاه جذب اتمی ساخت شرکت آلمانی Merc KGaA استفاده شد (Kakulu and Jacob, 2006:20) همچنین نمونه برگ را با آب مقطر شسته

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (س)

کاربرد سنجش از دور در مدل سازی اثرهای فاصله از جاده بر تجمع فلزات سنگین در برگ و ... / ۱۸۷

جدول ۱: مشخصات ماهواره سنتینل ۲ (آژانس فضایی اروپا، ۲۰۱۷)

2017 /March / 07	تاریخ پرتاب	Sentinel-2
Vega (Kourou)	ماهواره بر و سکوی پرتاب	
786 km	ارتفاع مدار	
پنج روز برای هر دو ماهواره، خورشید آهنگ	دوره بازگشت	
290 km	عرض تصویر	
Band 1 – Coastal aerosol, Band 2 – Blue, Band 3 – Green, Band 4 – Red, Band 5 – Vegetation Red Edge, Band 6 –Vegetation Red Edge, Band 7 – Vegetation Red Edge, Band 8 – NIR, Band 8A – Vegetation Red Edge, Band 9 – Water vapour, Band 10 – SWIR – Cirrus, Band 11 – SWIR Band 12 – SWIR	باندهای سنجنده	
B2, B3, B4, B8 : 10m B5, B6, B6, B8A, B11, B12 : 20m B1, B9, B10 : 60m	قدرت تفکیک مکانی	
۱۲ بیت	قدرت تفکیک رادیومتری	
۱۳ باند	قدرت تفکیک طیفی	
پنج روز	قدرت تفکیک زمانی	

گیاهی^۳ است که با توجه به اهداف موجود بر روی داده‌های ماهواره‌ای و در راستای اهداف مختلف صورت گرفت. به منظور تصحیح هندسی نیز از روش تصحیح هندسی چند جمله‌ای درجه دو استفاده شد. پردازش تصاویر در نرم افزار ENVI5.3 انجام گرفت. سپس با اعمال پردازش‌های مناسب باندهای مصنوعی ایجاد شد که در فرآیند مدل سازی مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت به منظور آماده سازی داده‌ها برای تجزیه و تحلیل و استخراج هر چه بهتر اطلاعات ماهواره‌ای در بارزسازی مشخصه‌های کمی در روی تصاویر از پردازش‌هایی برای ایجاد شاخص‌های مهم گیاهی استفاده می‌شود. در این مطالعه نیز از پردازش‌های مختلفی در بارزسازی مشخصه‌های کمی روی تصاویر استفاده شد (2002:19, Gonzales and Woods).

به منظور استخراج شاخص‌ها از تصویر که دارای باندهای طیفی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ و ۲۰ متر است، استفاده شد که شاخص‌های مورد نظر به شرح جدول ۲ است.

و پایش ابرها است، قرار دارند (جدول ۱). تصاویر مورد استفاده برای پژوهش حاضر در تاریخ ۲۰ مرداد ۱۳۹۶ (11/2017/August) مطابق با نمونه برداری زمینی دریافت شد. به منظور ساخت شاخص‌های گیاهی پیش پردازش انجام شد که در آن خطاها، نویزها و اعوجاج‌های موجود در تصاویر شناسایی و تصحیح می‌شوند و سپس داده‌های تصحیح شده در مرحله پردازش مورد استفاده قرار می‌گیرند. اصلی ترین انجام عملیات پیش پردازش، تصحیح هندسی و رادیومتری است: فرآیند پیش پردازش تصاویر به منظور استخراج هر چه بهتر اطلاعات انجام شد. فرآیند تصحیح اتمسفری روی تصاویر ماهواره سنتینل ۲ تا حدودی صورت گرفته اما ارزش رقومی این تصاویر بین ۰ تا ۲۸۰۰۰ متغیر است که برای پردازش تصویر، ارزش رقومی پیکسل‌ها در تصویر با استفاده از دستور Quick^۱ به بازه ۰ تا ۱ تبدیل شد. پردازش تصاویر نیز شامل ادغام باندها^۲ و ساختن شاخص‌های

1- Quick Atmospheric Correction

2- Band Integration

3- Vegetation Index Making

جدول ۲: شاخص‌های گیاهی

منبع	فرمول محاسبه شاخص	شاخص‌های محاسباتی
(Wang and Qin, 2007:37)	$\frac{Nir - Red}{Nir + Red}$	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)
(Zhanget al., 2018:41)	Bands [(7/5) - 1]/[(4 - 2)/6]	HMSSI (Heavy Metal Stress-sensitive Index)
(Soburaal., 2022:34)	$(L=0.5) \frac{Nir-Red}{Nir+Red+L} (1 + L)$	SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)
Merzlyak(et al., 2020:28)	(RED-BLUE) / NIR	PSRI (Plant Senescence Reflectance Index)

دربر می‌گیرند که با هم هم‌خوانی دارند و در آخر یک راه حل با کمینه خطا برای مسئله هم‌گرایی می‌کنند (نظریاتی و همکاران، ۱۴۰۱:۱۲).

- مدل جمعی تعمیم یافته

عدم نیاز به نرمال بودن داده‌های ورودی و نداشتن پیش فرض راجع به شکل منحنی‌های پاسخ متغیرهای محیطی از ویژگی‌های مهم مدل جمعی تعمیم یافته است. این روش تعمیم یافته روش رگرسیون خطی و رگرسیون منطقی است، از این رو به آن روش افزایشی گفته می‌شود. زیرا این مدل را می‌توان به صورت مجموع چند تابع غیرخطی بیان نمود (پیری صحراگرد و زارع چاهوکی، ۱۴۰۰:۲).

- الگوریتم جنگل تصادفی

الگوریتم جنگل تصادفی یک الگوریتم گروهی با مجموعه‌ای از درختان تصمیم است. دقت طبقه‌بندی روش جنگل تصادفی با ساخت مجموعه‌ای از درختان و رأی‌گیری بین آن‌ها برای به دست آوردن رده‌ای با بیشترین تعداد رأی، پیشرفت‌های قابل توجهی داشته است. به منظور تعداد بهینه برآورد گره‌ها، از جذر تعداد کل متغیرها استفاده شد و همچنین مقدار نسبت زیر نمونه^۹ از ۰/۵ تا ۰/۹ مورد آزمون و بررسی قرار گرفته است (نظریاتی و همکاران، ۱۴۰۱:۱۲).

- روش ناپارامتریک

روش‌های ناپارامتریک در دهه‌های اخیر توسعه یافته‌اند که دارای مزایایی مانند تفسیر آسان نتایج، عدم نیاز به پیروی از هرگونه توزیع و چند متغیره بودن است. از جمله روش‌های مختلف ناپارامتریک می‌توان به مدل شبکه عصبی مصنوعی^۱، مدل جمعی تعمیم یافته^۲، جنگل تصادفی^۳، ماشین بردار پشتیبان^۴ و نزدیک‌ترین همسایه^۵ اشاره کرد (Zheng et al., 2007: 42).

- مدل شبکه عصبی مصنوعی

در مدل شبکه عصبی به طور گسترده‌ای از روش‌های یادگیری ماشین استفاده می‌شود. در این مدل از سیستم عصبی مغز انسان و مجموعه عظیمی از واحدهای پردازش الهام گرفته شده است، که به عنوان یک سیستم جمعی کار و مشکلات را حل می‌کند. این مدل‌ها، مانند دیگر روش‌های هوش مصنوعی، می‌توانند روابط پیچیده و غیرخطی میان پدیده‌ها را ساده کنند. شبکه عصبی پرسپترون چند لایه^۶ و تابع پایه شعاعی^۷ از مهم‌ترین الگوریتم‌های ANN هستند که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند زیرا قدرت کارایی بالایی در هنگام حل مشکلات دارند. شبکه عصبی شامل نورون‌هایی است که لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی را

- 1- Artificial Neural Networks: ANN
- 2- Generalized Additive Model: GAM
- 3- Random Forest: RF
- 4- Support Vector Machine: SVM
- 5- k-Nearest Neighbors: kNN
- 6- Multi-Layer Perceptron: MLP
- 7- Radial Basic Functions: RBF

8- Predictors

9- Subsample Proportion

- الگوریتم ماشین بردار پشتیبان

برای مدل‌سازی با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان از توابع پایه شعاعی، چندجمله‌ای درجه دو و سه، سیگموئید و خطی در این مطالعه استفاده شد. در این روش مقدار گاما معمولاً از تقسیم یک بر تعداد متغیرهای مستقل که در این جا تعداد باندهای اصلی و مصنوعی است، به دست می‌آید. برای تعیین مقادیر بهینه ظرفیت^۲ و اپسیلون^۳ از اعتبارسنجی متقابل^۴ و جستجوی خودکار شبکه‌ای با اعتبارسنجی ۱۰ قسمتی و تکرار ۱۰۰۰ بار استفاده شد. مقدار ظرفیت از ۱ تا حداکثر ۵۰ و مقدار اپسیلون از ۰/۱ تا حداکثر ۰/۵ در نظر گرفته شد (نظریاتی و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۲).

- مدل‌سازی

به منظور ارزیابی و برازش مدل‌های رگرسیونی بین متغیرهای کمی و ارزش‌های طیفی متناظر با قطعات نمونه در داده‌های ماهواره‌ای از روش‌های ناپارامتریک و مدل رگرسیون خطی چندگانه تعمیم‌یافته، ۳۰ درصد از داده‌ها به صورت تصادفی انتخاب و به عنوان مجموعه داده‌های ارزیابی و ۷۰ درصد دیگر برای آزمون کنار گذاشته شدند. با استفاده از معیار ضریب تبیین (R^2) اعتبار مدل‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از معیارهای درصد میانگین مجذور مربعات خطا (رابطه ۲) و درصد اریبی (رابطه ۳)، اعتبار مدل‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت.

- الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه

در اجرای این روش از چهار معیار فاصله اقلیدسی، مربع فاصله اقلیدسی، منهن و چیشف به صورت وزن داده شده و داده‌ها به صورت استاندارد استفاده شد. با توجه به اهمیت تعداد همسایه، مقدار بهینه این پارامتر بین ۱ تا ۳۵ در نظر گرفته شد. در این روش نیز با جستجوی خودکار شبکه‌ای و اعتبارسنجی ۱۰ قسمتی و ۱۰۰۰ بار تکرار انجام شده است (نظریاتی و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۲).

رابطه (۲)

$$RMSE\% = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 / n}}{\bar{y}} \times 100$$

رابطه (۳)

$$Bias\% = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) / n}{\bar{y}} \times 100$$

- روش‌های آماری انجام پژوهش

داده‌های آماری به دست آمده به وسیله نرم‌افزار SPSS26.0 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پس از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، از آزمون شاپیرو - ویلک برای مقایسه غلظت فلزات سنگین در برگ و خاک در بین قطعات نمونه مختلف استفاده شد. برای بررسی همبستگی بین مقادیر غلظت فلزات سنگین در خاک و برگ بلوط از آزمون همبستگی اسپیرمن استفاده شد.

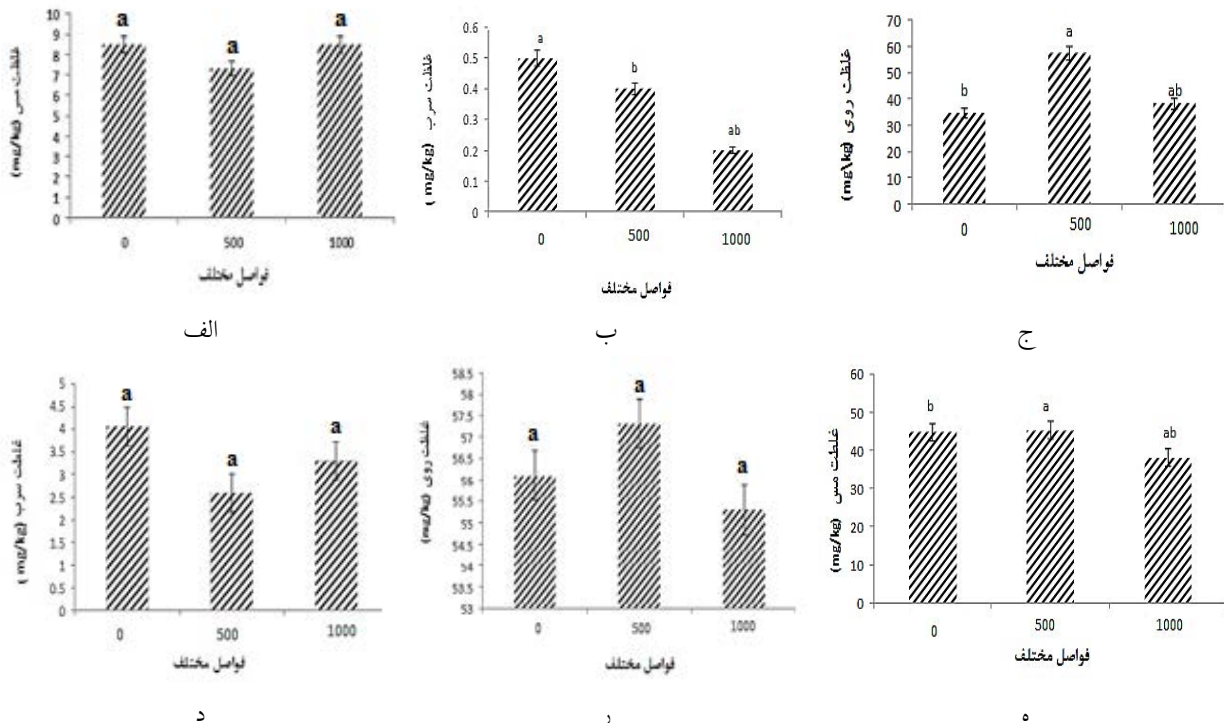
در این روابط \hat{Y} مقدار برآورد شده، \bar{Y} میانگین برآورد شده و Y مقدار مشاهده شده و همچنین n تعداد مشاهدات (قطعات نمونه) است. برای صحت‌سنجی و البته برای اطمینان از صحت تصحیح هندسی تصویر، در ابتدا با استفاده از نقشه وکتوری جاده و انطباق دقیق لایه جاده‌ها با تصویر، صحت تطابق هندسی تصویر مورد بررسی قرار گرفت. از نرم‌افزار ArcGIS_{10.8.2} برای پیاده کردن قطعات نمونه بر روی تصویر، از نرم‌افزار ENVI_{5.3} برای پردازش تصویر و از نرم‌افزار STATISTICA₁₂ برای مدل‌سازی استفاده شد.

نتایج

- مقایسه میانگین فلزات سنگین در برگ گونه بلوط ایرانی و خاک

نتایج حاصل از مقایسه میانگین بین غلظت فلزات سنگین برگ‌ها و خاک بلوط ایرانی با استفاده از آزمون‌های تحلیل واریانس (ANOVA)، کروسکال والیس و آزمون‌های

- 1- Gamma
- 2- Capacity
- 3- Epsilon
- 4- Cross-Validation



نگاره ۲: مقایسه میانگین غلظت فلزات (الف: مس، ب: سرب و ج: روی در برگ و؛ د: سرب، ر: روی و ه: مس) در خاک با استفاده از آزمون کرومکال والیس (حروف مشابه بیانگر عدم معنی داری است)

جدول ۳: مقادیر متوسط تجمع زیستی (BAF) فلزات سنگین (سرب، روی، مس) از خاک به برگ

مقدار شاخص BAF	فلز	نوع گونه
0.2	سرب	بلوط ایرانی
0.5	روی	
0.2	مس	

مدلسازی بین متغیرهای کمی و ارزش‌های طیفی - متناظر با روش‌های ناپارامتریک

بررسی مدلسازی روش‌های ناپارامتریک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-2 نشان داد، به ترتیب برای سه فلز سرب، روی و مس بالاترین مقادیر ضریب تبیین (۰/۸۵، ۰/۸۸ و ۰/۹۷) به دست آمد و در همه این فلزات مورد بررسی الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی (ANN) بیشترین دقت را به دست داد. همچنین با توجه به نتایج حاصل از الگوریتم جنگل تصادفی (RF) برای سه فلز مذکور به ترتیب

من‌وبیتنی‌یو در نگاره ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که سرب و روی در برگ بلوط ایرانی در فواصل مختلف مجاور جاده، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر در سطح ۰/۰۵ دارای اختلاف معنی‌داری است، اما مس در فواصل مختلف در سطح ۰/۰۵ از اختلاف معنی‌داری برخوردار است. سرب و روی در فواصل مختلف خاک در سطح ۰/۰۵ اختلاف معنی‌داری نداشت، اما مس در فواصل مختلف خاک در سطح ۰/۰۵ از اختلاف معنی‌داری برخوردار بود.

- فاکتور تجمع زیستی

مقادیر متوسط فاکتور تجمع زیستی (BAF) فلزات سنگین از خاک به برگ در گونه بلوط ایرانی در جدول ۳ نشان داده شده است. میزان فاکتور تجمع زیستی عناصر سرب، روی و مس به ترتیب (۰/۲، ۰/۵، ۰/۲) میلی‌گرم بر کیلوگرم حاصل شد.

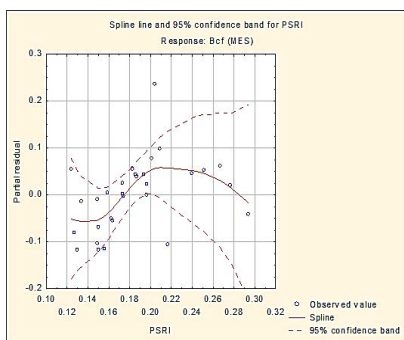
فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)

کاربرد سنجش از دور در مدل سازی اثرهای فاصله از جاده بر تجمع فلزات سنگین در برگ و ... / ۱۹۱

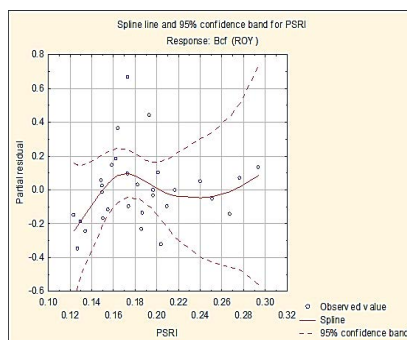
شاخص های PSRI، HMSSI و PSRI بیشترین اهمیت را در نسبت به متغیرهای مستقل (باندهای مصنوعی مستخرج از مدل سازی داشتند (جدول ۴). تصویر Sentinel-2) اثرگذار حاصل از برازش مدل جمعی در نگاره ۳، منحنی پاسخ متغیر شاخص تجمع زیستی تعمیم یافته (GAM) ارائه شده است. در بین سه فلز مورد

جدول ۴: نتایج اعتبار سنجی مدل سازی داده های ماهواره ای با شاخص تجمع زیستی برای سه فلز سرب، روی و مس

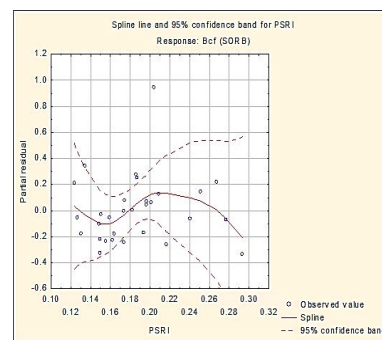
الگوریتم های ناپارامتریک					فلز	
KNN	SVM	RF	ANN	GAM		
$R^2=0.59$ RMSE%=13.17 BIAS%=10.31	$R^2=0.78$ RMSE%=11.72 BIAS%=5.06	$R^2=0.78$ RMSE%=15.14 BIAS%=12.20	$R^2=0.85$ RMSE%=11.03 BIAS%=8.49	$R^2=0.18$ RMSE%=22.24 BIAS%=16.49	سرب	
		Variable	Variable Rank	MLP- 4-4-1		BFGS 15
		PSRI	100			
		HMSSI	93			
NDVI	63					
معیار فاصله اقلیدسی	کرنل چند جمله ای درجه دو	SAVI	60			
$R^2=0.49$ RMSE%=38.62 BIAS%=-15.84	$R^2=0.53$ RMSE%=17.50 BIAS%=-4.11	$R^2=0.5$ RMSE%=16.75 BIAS%=3.75	$R^2=0.88$ RMSE%=10.32 BIAS%=2.82	$R^2=0.33$ RMSE%=15.64 BIAS%=14.00	روی	
		Variable	Variable Rank	MLP- 4-7-1		BFGS 33
		HMSSI	100			
		SAVI	96			
NDVI	91					
معیار فاصله اقلیدسی	کرنل شعاعی	PSRI	72			
$R^2=0.29$ RMSE%=19.14 BIAS%=13.24	$R^2=0.61$ RMSE%=36.82 BIAS%=-9.89	$R^2=0.78$ RMSE%=7.25 BIAS%=-4.14	$R^2=0.97$ RMSE%=8.12 BIAS%=12.01	$R^2=0.68$ RMSE%=9.23 BIAS%=-5.34	مس	
		Variable	Variable Rank	MLP- 4-6-1		BFGS 17
		PSRI	100			
		HMSSI	95			
NDVI	71					
معیار فاصله اقلیدسی	کرنل شعاعی	SAVI	57			



مس ($R^2=0.67$)



روی ($R^2=0.33$)



سرب ($R^2=0.18$)

نگاره ۳: نتایج برازش مدل جمعی تعمیم یافته

مس با هم تفاوت معنی‌داری نشان نداد و منشأ مس ضایعات صنعتی، اکسیداسیون روغن و سائیدگی لاستیک‌هاست و مقادیر سرب پایین‌تر از حد مجاز دستگاه بود.

همچنین Wu et al (2010:38) و Aksoy et al (2005:15) در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که مس از جمله عناصر مؤثر در ساختار آنزیم‌های کاتالیزوری بوده و منبع آن در گیاهان بیشتر، عوامل سنگ بستر، زایدات کشاورزی، ترافیک جاده‌ای و خاکستر است که این نتایج با پژوهش حاضر همخوانی دارد.

- مقایسه غلظت فلزات سنگین در خاک در فواصل مختلف

براساس یافته‌های مطالعه خاک، مقادیر غلظت سرب و روی در فواصل مختلف اختلاف معنی‌داری با هم نداشتند ولی مقادیر مس در فواصل مختلف با هم اختلاف معنی‌داری داشتند. منابع ورودی عنصر مس به خاک، زباله‌های شهری، صنعتی، کشاورزی، کودها و مواد شیمیایی هستند که از طریق کودهای حیوانی مایع، جامد و یا کودهای معدنی آن را به خاک اضافه می‌کنند این یافته‌ها با نتایج برخی از پژوهشگران از جمله Wu et al. (2010:38) و et al (2016:17). Botsou همخوانی دارد. برخلاف برگ درختان، نتایج تحقیق حاضر نشان داد که در خاک حاشیه بزرگراه غلظت فلزات سنگین از حد مجاز استاندارد بیشتر بوده و عامل تأثیرگذار در این زمینه، به خصوص غلظت سرب، عامل ترافیک است. در این راستا Mansour et al (2014:27). اذعان داشتند بالا بودن مقدار فلزات سنگین از حد استاندارد می‌تواند در رشد ریشه گیاهان بازدارندگی‌هایی ایجاد کند و مسمومیت گیاهی را به دنبال داشته باشد. مجد و همکاران (۱۱:۱۳۸۶) دریافتند که بین مقدار سرب و کادمیوم اختلاف معنی‌داری وجود دارد و این اختلاف مربوط به تأثیر عوامل ترافیکی و حمل و نقل بر روی آلودگی خاک است که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد.

بررسی ضریب تبیین برای فلز مس با مقدار $R^2=0.67$ نسبت به بقیه فلزات دارای دقت بالاتری است.

بحث

- مقایسه غلظت فلزات سنگین در برگ گونه بلوط ایرانی در فواصل مختلف

نتایج بررسی غلظت فلزات سنگین خاک در فاصله‌های مختلف از بزرگراه نشان داد که میانگین غلظت فلزات سنگین سرب و روی با افزایش فاصله از جاده هرچند دارای روند تقریباً نزولی بودند ولی از نظر آماری اختلاف معنی‌داری را نشان ندادند. اما غلظت مس خاک در فاصله ۵۰۰ متری افزایش معنی‌داری نسبت به حاشیه بزرگراه داشته است. از جمله دلایل این افزایش را می‌توان به وجود اراضی کشاورزی در این فاصله اشاره کرد. منابع ورودی عنصر مس به خاک زباله‌های شهری، صنعتی، کشاورزی، کودها و مواد شیمیایی هستند که از طریق کودهای حیوانی مایع و جامد و یا کودهای معدنی آن را به خاک اضافه می‌کنند (Zhang et al., 2018:41). براساس یافته‌ها مقادیر غلظت سرب و روی در برگ درختان بلوط ایرانی در فواصل مختلف تفاوت معنی‌داری با هم داشتند ولی مقادیر مس در فواصل مختلف، با هم اختلاف معنی‌داری نشان نداد.

در این راستا Mansour (27:2014) به این نتیجه رسید که تفاوت معنی‌داری بین غلظت سرب و روی در برگ گونه‌ها وجود دارد که علت آن را می‌توان به تراکم ترافیک و فعالیت‌های انسانی نسبت داد و بالا بودن مقادیر فلز روی در پژوهش حاضر را سایش تایرهای خودرو عنوان کرد و غلظت سرب را ناشی از تولید گازهای گلخانه‌ای و استفاده از وسایل نقلیه با استفاده از بنزین سرب‌دار، عنوان نمود. همچنین اذعان داشتند که گرد و غبار جاده‌ها از طریق روزنه‌ها وارد بافت گیاه شده و در آن تجمع یافته‌اند. حاج رسولی‌ها و همکاران (۴:۱۳۸۵) به این نتیجه رسیدند که مقادیر روی با هم تفاوت معنی‌داری داشتند و غلظت مقادیر

برای تخمین غلظت فلزات سنگین را ممکن ساخته است. همچنین احتمالاً علت تغییرات بازتاب مشاهده شده مرتبط با این عامل حد وسط بوده باشد که علی‌رغم غیرفعال بودن فلزات سنگین به امواج محدوده مرئی و فرورسرخ، امکان تخمین فلزات سنگین را فراهم آورده است. به‌طورکلی می‌توان گفت نتایج حاصل از مطالعات (Wu et al(2005:39) و (Liu et al (2011:24). گویای ارتباط بین غلظت عناصر سنگین با باندهای محدوده مرئی و فرو سرخ بود که با نتایج حاصل شده در پژوهش حاضر همخوانی دارد. از طرفی (Bernardino et al (2019:15). با مطالعه‌ای که روی ارزیابی خطر سلامتی فلزات سنگین در خاک منطقه شهری استان جیانگ در چین انجام دادند؛ اذعان داشتند احتراق بنزین، سایش سطح جاده و خوردگی و استهلاک قطعات خودرو (مانند ترمز و لاستیک) و نشت روان‌کننده‌ها از منابع اصلی آلودگی روی و سرب در محیط‌های کنار جاده است. با توجه به تردد بالا در بزرگراه مورد مطالعه نتایج مطالعات (Bernardino et al (2019:15). و حسینی و همکاران (۷:۱۳۹۹) در حاشیه جاده‌های برون شهری همدان با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد. در بین سه فلز مورد بررسی فلز مس دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین ($R^2=0.97$) است. مس یکی از فلزات لازم در خاک برای رشد گیاه است که به شکل طبیعی نیز در خاک یافت می‌شود و معمولاً با مواد آلی تشکیل کمپلکس داده و به‌ندرت به‌صورت آزاد یا قابل تبادل وجود دارد. حتی ممکن است به‌علت کمبود این عنصر به‌عنوان یکی از ریز مغذی‌های مهم برای رشد گیاه، نیاز به اضافه نمودن آن به خاک باشد. همچنین با توجه به اینکه در بین سه فلز مورد مطالعه مس در فواصل مختلف خاک در سطح ۰/۰۵ از اختلاف معنی‌داری برخوردار بود؛ لذا بالاترین ضریب تبیین را با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی نشان داد.

- شاخص تجمع زیستی

براساس یافته‌های به‌دست آمده از محاسبه شاخص تجمع زیستی و مقایسه آن‌ها با طبقه‌بندی پیشنهادی (Ma et (25:2001) al. برای گیاهان مطابق جدول ۳ گونه بلوط ایرانی در رابطه با فلزات سرب، روی و مس از خاک به برگ به‌عنوان یک گیاه تجمع‌دهنده عمل می‌کند. موافق با نتایج این تحقیق، در بررسی خداکرمی و همکاران (۸:۱۳۸۹) نیز بلوط ایرانی در ارتباط با انباشت آلاینده سرب در رده گیاهان ابرجاذب قرار گرفت که از نظر جذب ریشه‌ای توان بالایی دارد. همچنین (Madejón et al(2006: 26) بیان کردند برگ‌های بلوط مقاوم‌تر از برگ‌های زیتون است. غلظت عناصر در برگ‌ها و میوه‌ها با زمان کاسته شده و در نتیجه از خطر سمیت در شبکه غذایی کاسته می‌شود.

- مدل‌سازی بین متغیرهای کمی و ارزش‌های طیفی متناظر با روش‌های ناپارامتریک

بررسی و مقایسه پنج الگوریتم ناپارامتریک، GAM، ANN، RF، SVM و KNN نشان داد مقادیر ضریب تبیین مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به‌ترتیب برای سه فلز سرب، روی و مس (۰/۸۵، ۰/۸۸ و ۰/۹۷) دارای بالاترین مقدار است. با توجه به درجه اهمیت باند مصنوعی PSRI در افزایش دقت مدل‌سازی با تصاویر ماهواره‌ای و تأثیرگذاری باندهای محدوده مرئی و فرورسرخ نزدیک میزان بازتاب اندازه‌گیری شده با روش طیف‌سنجی نشان داد که با افزایش غلظت عناصر سنگین، میزان بازتاب در محدوده مرئی و فرورسرخ کاهش می‌یابد (Liu et al., 2011:24). لازم به ذکر است طی پژوهش (Wu et al(2005:39) فلزات سنگین در محدوده مرئی و فرورسرخ نسبت به امواج، غیرفعال هستند و در واقع عوامل حد واسط مؤثر در جذب فلزات سنگین در خاک مانند مواد آلی، اکسیدهای آهن و یا رس‌ها از عوامل اصلی ارتباط‌دهنده میان بازتاب و غلظت فلزات سنگین هستند. بنابراین می‌توان اذعان داشت که وجود این عوامل حد واسط است که امکان استفاده از تغییرات بازتاب

نتیجه گیری نهایی

Besser با استفاده از روش های داده محور در مراتع پشتکوه استان یزد. حفاظت زیست بوم گیاهان، ۹ (۱۹): ۲۷۹-۲۶۱.

۳- جمینی، ذولفقاری، نصرآبادی، قبادی؛ داود، امیرعلی، زهرا، شادی. (۱۳۹۵). چالش های زیست محیطی و اثرات آن بر ساکنین روستای بدرآباد با استفاده از روش نظریه بنیانی. جغرافیا و پایداری محیط، ۶(۲): ۷۱-۸۷.

۴- حاج رسولی ها، امینی، هودجی، نجفی؛ شاپور، حسین، مهران، پیام. (۱۳۸۵). زیست ردیابی آلودگی هوا و خاک در منطقه اصفهان. پژوهش در علوم کشاورزی، ۲(۲): ۵۴-۳۹.

۵- حبیبی، بهروزی، نوحه گر؛ سمانه، محمود، احمد. (۱۴۰۱). اندازه گیری و ارزیابی تجمع آلودگی فلزات سنگین در خاک و برگ سه گونه ای درختی (چریش، کهور و کنوکارپوس) در شهر بندرعباس. فصلنامه علوم محیطی، انتشار آنلاین از ۱ آبان ۱۴۰۱.

۶- حسونند، قاسمی آقباش، سلگی، پژوهان؛ هوا، فرهاد، عیسی، ایمان. (۱۳۹۷). اثرهای فاصله از جاده بر تجمع فلزات سنگین در خاک و برگ بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) در بزرگراه الشتر - خرم آباد. پژوهش و توسعه جنگل، ۴(۱): ۴۱-۲۹.

۷- حسینی، سبحان اردکانی، چراغی، لرستانی، مریخ پور؛ نیره سادات، سهیل، مهرداد، بهاره، هاجر. (۱۳۹۹). امکان سنجی استفاده از بومادران (*Achillea wilhelmsii*) و از مک (*Cardaria draba*) برای پایش و پالایش زیستی فلزات سنگین روی، سرب و نیکل در محیط کنار جاده ای. سلامت و محیط زیست، ۱۳ (۴): ۶۲۰-۶۰۷.

۸- خداکرمی، شیروانی، زاهد امیری، متینی زاده، صفری؛ یحیی، انوشیروان، قوام الدین، محمد، هوشمند. (۱۳۸۹). مقایسه مقدار جذب فلز سرب در اندام های مختلف (ریشه، ساقه و برگ) نهال های یکساله دو گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) و بنه (*Pistacia atlantica*) به روش محلول پاشی. مجله جنگل ایران، ۱(۴): ۳۲۰-۳۱۳.

۹- طالبی، ثاقب طالبی، جهان بازی گوجانی؛ محمود، خسرو، حسن. (۱۳۸۵). بررسی نیاز رویشگاهی و برخی

پژوهش پیش رو با هدف کاربرد فنون سنجش از دور و تحلیل های طیفی در ارزیابی و مدل سازی تجمع فلزات سنگین در گونه بلوط ایرانی انجام شد. نتایج نشان داد تصاویر Sentinel-2 به همراه مدل شبکه عصبی مصنوعی قابلیت نسبتاً خوبی در مدل سازی میزان شاخص تجمع زیستی منطقه دارند. با توجه به کمبود زمان و هزینه برای پژوهش ها در این زمینه در راستای نتایج به دست آمده پیشنهاد می شود که از آنجا که گونه بلوط ایرانی تجمع دهنده فلزات سنگین تشخیص داده شد، از این گونه برای کاهش آلودگی ها در بزرگراه ها استفاده شود. همچنین پیشنهاد می شود درختان در فواصل مناسب از جاده به گونه ای کاشته شوند که بهترین فاصله را در جذب آلودگی داشته باشند و کمترین خسارت را از آلودگی ببینند. از جمله خلاء های مطالعاتی در این زمینه می توان به هزینه بالای آزمایشگاه و همچنین کم بودن دقت تصویر ماهواره ای اشاره کرد؛ که در صورت کافی بودن منابع مالی امکان استفاده از تصاویر با دقت بالاتر می تواند جایگزین مناسب تری باشد تا نتایج دقیق تری در برآورد و مدل سازی شاخص تجمع زیستی به دست دهد.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شده است. به این وسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه به منظور تأمین مالی طرح پژوهشی با کد ۰۲-۱۴۰۲-۰۴ تشکر و قدردانی می شود.

منابع و مآخذ

- ۱- انصاری، راهنورد، سوادکوهی؛ امیر، آپتین، فرزاد. (۱۴۰۰). برآورد غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در خاک منطقه لنجان با استفاده از اندازه گیری زمینی و تصاویر ماهواره ای. مطالعات علوم محیط زیست، ۶(۱): ۳۴۵۹-۳۴۶۵.
- ۲- پیری صحراگرد، زارع چاهوکی؛ حسین، محمدعلی. (۱۴۰۰). پیش بینی پراکنش رویشگاه بالقوه گونه *Artemisia sieberi*

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سفر)

کاربرد سنجش از دور در مدل‌سازی اثرهای فاصله از جاده بر تجمع فلزات سنگین در برگ و ... / ۱۹۵

trace metals in roadside and off-road agricultural soils along two major highways in Attica's region, Greece. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 132, 101-110.

18- Debnath, B., Singh, W. S., & Manna, K. (2019). Sources and toxicological effects of lead on human health. *Indian Journal of Medical Specialities*, 10(2), 66-71.

19- Deng, J., & Wong, H. S. P. (2007). A compact SPICE model for carbon-nanotube field-effect transistors including nonidealities and its application—Part I: Model of the intrinsic channel region. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 54(12), 3186-3194.

20- Gonzales, R.C. & Woods, R.E., 2002, *Digital Image Processing*, Pearson; 3rd edition (August 31, 2007), English, 976 pages.

21- Kakulu, S. E., & Jacob, J. O. (2006). Comparison of digestion methods for trace metal determination in moss samples. In *Proceeding of the 1st National Conference of the Faculty of Science, University of Abuja* (Vol. 77, p. 81).

22- Kumar, V., Sharma, A., Kaur, P., Sidhu, G. P. S., Bali, A. S., Bhardwaj, R., ... & Cerda, A. (2019). Pollution assessment of heavy metals in soils of India and ecological risk assessment: A state-of-the-art. *Chemosphere*, 216, 449-462.

23- Liao, B., Guo, Z., Probst, A., & Probst, J. L. (2005). Soil heavy metal contamination and acid deposition: experimental approach on two forest soils in Hunan, Southern China. *Geoderma*, 127(1-2), 91-103.

24- Liu, Y., Li, W., Wu, G., & Xu, X. (2011). Feasibility of estimating heavy metal contaminations in floodplain soils using laboratory-based hyperspectral data—A case study along Le'an River, China. *Geo-spatial Information Science*, 14(1), 10-16.

25- Ma, L. Q., Komar, K. M., Tu, C., Zhang, W., Cai, Y., & Kennelley, E. D. (2001). A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, 409(6820), 579-579.

26- Madejón, E., De Mora, A. P., Felipe, E., Burgos, P., & Cabrera, F. (2006). Soil amendments reduce trace element solubility in a contaminated soil and allow regrowth of natural vegetation. *Environmental Pollution*, 139(1), 40-52.

27- Mansour, R. S. (2014). The pollution of tree leaves

خصوصیات کمی و کیفی بلوط ایرانی در جنگل‌های استان چهارمحال و بختیاری. فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۴ (۱): ۷۹-۶۷.

۱۰- کشاورز شکر، عباس (۱۳۸۳). بررسی تأثیر اسیدیته خاک بر روی قابلیت دسترسی مواد مغذی N,P,K فلزات سنگین در روند رشد توده های دست کاشت توسکای ییلاقی، افرا پلت و کاج تدا در جنگل سیاهکل شمال ایران. رساله دکتری رشته علوم محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، صفحات ۱-۱۲۸.

۱۱- مجد، تائبی، افیونی؛ سعید، امیر، مجید. (۱۳۸۶). آلودگی خاک حاشیه خیابان‌های شهری به سرب و کادمیوم. محیط شناسی، ۴۳(۳۳): ۱۰-۱.

۱۲- نظریانی، فلاح، حمیدی، ورامش؛ نسترن، اصغر، سیدکوثر، سعید. (۱۴۰۱). برآورد مشخصه‌های کمی جنگل‌های زاگرس با استفاده از الگوریتم‌های ناپارامتریک داده‌کاوی (بررسی موردی: کوه‌دشت، لرستان). پژوهش و توسعه جنگل، ۸ (۳): ۲۶۳-۲۴۹.

13- Ahmed, F., Dwivedi, S., Shaalan, N. M., Kumar, S., Arshi, N., Alshoaibi, A., & Husain, F. M. (2020). Development of selenium nanoparticle based agriculture sensor for heavy metal toxicity detection. *Agriculture*, 10(12), 610.

14- Aksoy, A., Demirezen, D., & Duman, F. (2005). Bioaccumulation, detection and analyses of heavy metal pollution in Sultan Marsh and its environment. *Water, air, and soil pollution*, 164, 241-255.

15- Bernardino, C. A., Mahler, C. F., Santelli, R. E., Freire, A. S., Braz, B. F., & Novo, L. A. (2019). Metal accumulation in roadside soils of Rio de Janeiro, Brazil: impact of traffic volume, road age, and urbanization level. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-14.

16- Bi, X., Feng, X., Yang, Y., Li, X., Shin, G. P., Li, F., & Fu, Z. (2009). Allocation and source attribution of lead and cadmium in maize (*Zea mays* L.) impacted by smelting emissions. *Environmental Pollution*, 157(3), 834-839.

17- Botsou, F., Sungur, A., Kelepertzis, E., & Soylak, M. (2016). Insights into the chemical partitioning of

- 35- Tan, K., Wang, H., Chen, L., Du, Q., Du, P., & Pan, C. (2020). Estimation of the spatial distribution of heavy metal in agricultural soils using airborne hyperspectral imaging and random forest. *Journal of hazardous materials*, 382, 120987.
- 36- Wang, J., Hu, X., Shi, T., He, L., Hu, W., & Wu, G. (2022). Assessing toxic metal chromium in the soil in coal mining areas via proximal sensing: Prerequisites for land rehabilitation and sustainable development. *Geoderma*, 405, 115399.
- 37- Wang, X. S., & Qin, Y. (2007). Relationships between heavy metals and iron oxides, fulvic acids, particle size fractions in urban roadside soils. *Environmental geology*, 52, 63-69.
- 38- Wu, C., & Zhang, L. (2010). Heavy metal concentrations and their possible sources in paddy soils of a modern agricultural zone, southeastern China. *Environmental Earth Sciences*, 60, 45-56.
- 39- Wu, Y., Chen, J., Wu, X., Tian, Q., Ji, J., & Qin, Z. (2005). Possibilities of reflectance spectroscopy for the assessment of contaminant elements in suburban soils. *Applied Geochemistry*, 20(6), 1051-1059.
- 40- Xie, K. (1998). Determination of heavy metal contents in soil and plants around an urban environment and rural area [dissertation].
- 41- Zhang, Z., Liu, M., Liu, X., & Zhou, G. (2018). A new vegetation index based on multitemporal Sentinel-2 images for discriminating heavy metal stress levels in rice. *Sensors*, 18(7), 2172.
- 42- Zheng, G., Chen, J. M., Tian, Q. J., Ju, W. M., & Xia, X. Q. (2007). Combining remote sensing imagery and forest age inventory for biomass mapping. *Journal of Environmental Management*, 85(3), 616-623.
- with heavy metal in Syria. *International Journal of ChemTech Research*, 6(4), 2283-2290.
- 28- Merzlyak, M. N., Gitelson, A. A., Chivkunova, O. B., & Rakitin, V. Y. (1999). Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia plantarum*, 106(1), 135-141.
- 29- Nadgórska-Socha, A., Kandziora-Ciupa, M., Trzęsicki, M., & Barczyk, G. (2017). Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes. *Chemosphere*, 183, 471-482.
- 30- Nikolaevich, V. K. (2023). Central Russia heavy metal contamination model based on satellite imagery and machine learning. *Geomatics and Environmental Engineering*, 47(1), 137-151.
- 31- Patel, K. S., Sharma, R., Dahariya, N. S., Yadav, A., Blazhev, B., Matini, L., & Hoinkis, J. (2015). Heavy metal contamination of tree leaves. *American Journal of Analytical Chemistry*, 6(08), 687.
- 32- Petronio, B. M., Pietrantonio, M., Pietroletti, M., & Cardellicchio, N. (2000). Environmental science and pollution research. In proceedings Seventh FECS Conference, Metal speciation and bio-availability in marine sediments of Northern Adriatic sea (p. 320).
- 33- Scheuber, M., & Köhl, M. (2003). Assessment of non-wood-goods and services by cluster sampling. *Advances in forest inventory for sustainable forest management and biodiversity monitoring*, 157-171.
- 34- Sobura, S., Hejmanowska, B., Widłak, M., & Muszyńska, J. (2022). The Application of Remote Sensing Techniques and Spectral Analyzes to Assess the Content of Heavy Metals in Soil—A Case Study of Barania Góra Reserve, Poland. *Geomatics and Environmental Engineering*, 16(4), 187-213.

COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 3.0 Unported \(CC BY-ND 3.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/)

