

**Doktorska disertacija: „Uticaj vibro-aktiviranih minerala na sadržaj teških metala u kupusu (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) uzgajanom na onečišćenom zemljištu“**

## **SAŽETAK**

U ovoj doktorskoj disertaciji predstavljeno je istraživanje kontaminacije poljoprivrednih tala potencijalno toksičnim elementima: bakrom (Cu), arsenom (As), kadmijem (Cd) i olovom (Pb), njihov prenos u lisnato povrće (raštika, *Brassica oleracea* var. *acephala*) te povezani ekološki i zdravstveni rizici, s posebnim naglaskom na učinak vibro-aktiviranih mineralnih dodataka (zeolit i kalcit).

Istraživanje je provedeno na tri lokaliteta na području Mostara (Donja Jasenica, Zalik i Vrapčići) tokom dvije vegetacijske sezone, uz analizu početnog i završnog stanja zemljišta te glavne i naknadne sadnje raštike.

Procjena stanja zemljišta određivanjem stepena onečišćenja (So) i potencijalnog ekološkog rizika (PERI) pokazala je izražene prostorne razlike, pri čemu je kadmij identificiran kao dominantni nosilac ekološkog rizika. Vrijednosti PERI kretale su se od 73,3 (umjeren rizik) do 176,0 (vrlo visok rizik), s najvećim opterećenjem na lokalitetu Zalik. Procjena zdravstvenog rizika kontakta sa zemljištem (HI i CR) ukazala je na nizak nekancerogeni i kancerogeni rizik za odrasle, uz povećanu osjetljivost djece.

Koncentracije teških metala u raštici pokazale su izraženu lokacijsku i sezonsku varijabilnost te zavisnost o načinu tretiranja zemljišta. Primjena vibro – aktiviranih minerala rezultirala je smanjenjem koncentracija As u listu raštike za 10 – 44% i Pb do 61%, dok je učinak na Cd bio varijabilan i lokacijski specifičan. Na lokalitetima Vrapčići i Jasenica prosječne vrijednosti Cd u listu raštike su povišene za 28 – 46% na poljima tretiranim VAM-om dok je u Zaliku prosječna vrijednost Cd u listu raštike smanjena za 6 % uz primjenu VAM-a.

Vrijednosti hazard indeksa (HI) za konzumaciju raštike kretale su se ispod referentne granice ( $HI < 1$ ) za odrasle (0,03–0,29) i djecu (0,04–0,38). Ukupni kancerogeni rizik (TCR) za odraslu populaciju ostao je unutar prihvatljivog raspona ( $10^{-6} - 10^{-4}$ ) s maksimalnom vrijednošću od  $7,75 \times 10^{-5}$  na lokalitetu Vrapčići, dok je maksimalna vrijednost ukupnog kancerogenog rizika (TCR) za djecu na iznosila  $1,01 \times 10^{-4}$ .

Rezultati pokazuju da primjena VAM-a (zeolita i kalcita) može smanjiti biodostupnost As i Pb i pripadajuće zdravstvene rizike. Za Cd nije utvrđen dosljedan učinak tretmana, rezultati pokazuju izraženu lokacijsku specifičnost, a u većem broju uzoraka koncentracije su bile više pri primjeni VAM-a.

**Ključne riječi: teški metali, zemljište, procjena zdravstvenog i ekološkog rizika, *Brassica oleracea* var. *acephala*; vibro-aktivirani minerali, zeolit**

***The Effect of Vibro-Activated Minerals on Heavy Metal Content in Kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) Cultivated on Contaminated Soil***

**ABSTRACT**

This doctoral dissertation presents a study on the contamination of agricultural soil with potentially toxic elements: copper (Cu), arsenic (As), cadmium (Cd), and lead (Pb), their transfer to leafy vegetables (collard greens, *Brassica oleracea* var. *acephala*), and the associated ecological and health risks, with a particular emphasis on the effect of vibro-activated mineral additions (zeolite and calcite).

The research was conducted at three locations in the Mostar area (Donja Jasenica, Zalik, and Vrapčići) over two growing seasons, including the analysis of initial and final soil conditions, as well as primary and secondary planting of collard greens.

Soil status assessment using the degree of contamination (So) and the potential ecological risk index (PERI) revealed pronounced spatial variability, with cadmium identified as the dominant contributor to ecological risk. PERI values ranged from 73.3 (moderate risk) to 176.0 (very high risk), with the highest burden recorded at the Zalik site. Health risk assessment related to soil exposure (HI and CR) indicated low non-carcinogenic and carcinogenic risks for adults, with increased sensitivity observed in children.

Heavy metal concentrations in collard greens showed significant spatial and seasonal variability, as well as dependence on soil treatment. The application of vibro-activated minerals resulted in a reduction of As concentrations in leaves by 10–44% and Pb by up to 61%, while the effect on Cd was variable and site-specific. At the Vrapčići and Jasenica sites, average Cd concentrations in leaves increased by 28–46% in VAM-treated plots, whereas at the Zalik site, the average Cd concentration decreased by 6% following VAM application.

Hazard index (HI) values for collard green consumption were below the reference threshold ( $HI < 1$ ) for both adults (0.03–0.29) and children (0.04–0.38). The total carcinogenic risk (TCR) for adults remained within the acceptable range ( $10^{-6}$ – $10^{-4}$ ), with a maximum value of  $7.75 \times 10^{-5}$  at the Vrapčići site, while the maximum TCR value for children reached  $1.01 \times 10^{-4}$ .

The results indicate that the application of VAM (zeolite and calcite) can reduce the bioavailability of As and Pb and the associated health risks. No consistent effect was observed for Cd; the results demonstrate pronounced site-specific variability, with higher concentrations recorded in a greater number of samples under VAM treatment.

**Keywords:** heavy metals, soil, assessment of health and ecological risk, *Brassica oleracea* var. *acephala*, vibro-activated minerals, zeolite