

ПРОЦЈЕНА ЕФИКАСНОСТИ У ПРОЦЕСИМА СТАБИЛИЗАЦИЈЕ/СОЛИДИФИКАЦИЈЕ ТОКСИЧНИХ МЕТАЛА

EVALUATING EFFICIENCY IN PROCESSES OF STABILIZATION / SOLIDIFICATION OF TOXIC METALS

А. Дошић¹, И. Савић², М. Глигорић¹

¹Универзитет у Источном Сарајеву, Технолошки факултет, Каракај бб,
75400 Зворник, БиХ, e-mail: aleksandar.dosic@gmail.com, miladin.gligoric@gmail.com

²Универзитет у Нишу, Технолошки факултет, Булевар Ослобођења 124
16 000 Лесковац, Србија, e-mail: vana.savic@yahoo.com

Сажетак: Одлагањем јаловине која настаје као резултат издвајања концентрата метала олова и цинка из руде, у процесу флотације у руднику „Сасе“ у Сребреници, може довести до оптерећења земљишта значајним количинама токсичних метала.

Процеси и технике стабилизације и солидификације (С/С) које се данас користе представљају технологије које нуде третман опасног и другог отпада из индустрије и комуналних извора. Ова технологија укључује мјешање везивног материјала са контаминираним материјалом, штити животну средину имобилишући штетне компоненте.

У овом раду токсични метали, као што су Pb, Zn, Ni, Cr и Cu, који се налазе у јаловини, имобилисани су компактирањем са различитим имобилизационим агенсима (коришћени су креч и зеолит) у монолите различитих пропорција. Ефикасност имобилизационих поступака праћена је одређивањем коефицијената дифузије и индекса излужљивости који ће послужити за оцјену ефикасности примјењених имобилизационих техника.

Ради испитивања могућности коришћења добијених солидификата у пракси испитано је излуживање метала, као мјерило ефикасности процеса солидификације и стабилизације. Отпадни материјал настао техником солидификације и стабилизације ће се на крају употребити у одређене сврхе или одложити.

Кључне ријечи: јаловина, токсични метали, стабилизација/солидификација, коефицијет дифузије, индекс излуживања.

Summary: Disposal of tailings occurs as a result from extraction concentrates of lead and zinc, from the flotation process in the mine “Sase” Srebrenica, land may be burdened with significant quantities of toxic metals.

The processes and techniques of stabilization and solidification (S/S) used today are the technologies that offer the treatment of hazardous and other wastes from industry and municipal sources. This technology involves mixing a binding material with contaminated material, to protect the environment immobilizing harmful components.

In this paper, toxic metals such as Pb, Zn, Ni, Cr and Cu, which are contained in the tailings, were immobilized with different immobilization compacting agents (used as lime and zeolite) in monoliths of different proportions. Efficiency of immobilization procedures followed by the determination of diffusion coefficients and leaching indexes that will serve to review the effectiveness of applied immobilizing techniques.

To examine the possibility of using solidified material obtained in practice is examined leaching of metals such tests as a measure of efficiency of the process of solidification and stabilization. Waste material from solidification and stabilization technology will eventually be used for specific purposes or disposed of.

Key words: tailings, toxic metals, stabilization/solidification, diffusion coefficient, leaching index.

1. УВОД

Одлагањем јаловине која настаје као резултат издвајања концентрата руде олова и цинка, земљиште може бити оптерећено значајним количинама тешких метала. Из тог разлога проналажење нових и усавршавање постојећих техника пречишћавања јаловине је од великог значаја. Метали представљају опасност за седимент, акватичне екосистеме али и за човјека због изражене тенденције инкорпорације у седимент, токсичности и способности биоаккумуляције. Токсични метали представљају један од основних контаминаната јаловине и неопходно је извршити њихов третман. Као ефикасна метода за рјешавање овог проблема показала се технологија солидификације и стабилизације.

Процеси и технике стабилизације и солидификације (C/C) су се развили у важан дио технологије животне средине. Као резултат многе C/C методе се промовишу и нуде као третман опасног и других отпада из индустрије и комуналних извора. Ова технологија, која укључује мјешање везивног материјала са контаминираним материјалом, штити животну средину имобилишући штетне компоненте. Везивни материјал реагује хемијски са водом из материјала који је третиран, изазивајући промјене у физичким и хемијским особинама и стабилизује штетне конституенте и тако спрјечава њихов даљи транспорт у животној средини.

Отпадни материјал настао техником солидификације и стабилизације ће се на крају употребити у одређене сврхе или одложити. Састав одложеног отпада се мијења током времена, а велики дио овог материјала није лако биодеграбиран. Ипак, раније конструисане депоније и њихове испуне садрже овакве материјале. Ове депоније продукују емисије што ће највјероватније чинити још деценијама или чак вијековима [1,2].

Излуживање је временски најдужа емисија која потиче од депонија. Стога оно одређује потребно вријеме за третман и контролу емисије. У циљу процјене потребног времена за третман излуживањем, данас се примењују различите методе, од мањих тестова који укључују мјешање до теренских тестова већег обима. Што су услови теста ближи условима на терену, резултати ће бити ближи стварним будућим вриједностима емисије на депонији. У циљу дизајнирања тестова излуживања који су поуздани за дугорочна предвиђања, најважније је познавање фактора који утичу на излуживање. Познавање ових фактора ће помоћи при утврђивању одговарајућих начина за унапређење стабилизације отпада на депонијама [3].

У раду је приказана процјена ефикасности метода солидификације/стабилизације, методе на бази којих је вршена процјена успјешности третмана отпадног муља јаловишта рудника олова и цинка „Сасе“ Сребреница. Метали као катјони или саставни дијелови ањонских једињења лако ступају у интеракције с макромолекулама биолошког материјала, обично формирајући јонске или водоничне везе. Међутим, могуће је формирање и органометалних једињења с различитим конституентима биолошког материјала и формирање хелата, због чега је фракција метала везаних за макромолекуле обично велика. Након апсорпције, метали се везују за виталне компоненте ћелије, као што су структурни протеини, ензими и нуклеинске киселине, при чему утичу на њено функционисање. Неки од ових метала, чак и у малим количинама могу изазвати озбиљне физиолошке и здравствене проблеме [4].

Циљ рада је био да се токсични метали (Pb, Zn, Ni, Cr и Cu), који се налазе у отпадном муљу јаловишта, имобилишу компактирањем са различитим имобилизационим агенсима (креч и зеолит) у монолите различитих пропорција, као и одређивање њихове ефикасности у зависности од бројних фактора. Ефикасност имобилизационих поступака зависи и од додатка имобилизационог агенса што је истраживањем испитано. Одређени су параметри (коэффициенти дифузије, индекси излужљивости) који ће послужити за оцјену ефикасности претходно примјењених имобилизационих техника.

Резултати добијени симулацијом ових услова ће даље омогућити моделовање понашања метала у смислу дугорочног "излуживања" из третиране јаловине као и процјену најефикаснијих агенаса за имобилизацију различитих метала у јаловини.

2. ОПШТИ ДИО

Солидификација и стабилизација представља мјешање или убацивање агенаса у циљу формирања кристалног, стакленог или полимерног окружења загађења. Ради безбједног депоновања седимент се обрађују превођењем у тешко растворне стабилне оксиде или уз додатак силиката и алкалија се преводе у нерастворну стакласту масу [4].

Процеси и технике стабилизације и солидификације (C/C) су се развили у важан дио технологије животне средине. Као резултат многе C/C методе се нуде за третман опасног и других отпада из индустрије и комуналних извора. Ова технологија, која укључује мјешање цемента или другог везивног материјала са контаминираним материјалом, штити животну средину имобилишући штетне компоненте. Везивни материјал реагује хемијски са водом из материјала који је третиран, изазивајући промјене у физичким и хемијским особинама и стабилизује штетне конституенте и тако спрјечава њихов даљи транспорт у животној средини

Појам хемијска фиксација се често користи за дефинисање солидификације или стабилизације, односно комбинације ове двије методе.

Уопштено, појам солидификација/стабилизација (C/C) се односи на процесе обраде отпада који подразумевају најмање један али најчешће оба горе описана поступка.

Бројни типови отпада су погодни за солидификацију/стабилизацију. Типови отпада који се најчешће и најефикасније имобилишу помоћу C/C метода су: контаминирано земљиште, талози из врећастих филтера, муљеви од пречишћавања воде, талози из евапоратора, остаци из скрубера након третмана отпадних гасова, пепео и лебдећи пепео из инсинератора, барски муљеви, концентровани водени отпад, хомогени чврсти отпад [5].

Солидификација се односи на технику у којој се отпад компактира у монолитну чврсту материју високог структурног интегритета. Солидификација не укључује обавезно хемијски интеракцију између отпада и реагенса који се користе за солидификацију, али отпад се сигурно механички везује за везивно средство. Миграција контаминанта се ограничава тако што се смањује површина која је изложена излуживању и/или изоловањем отпада у капсулу што има за посљедицу смањивање пермеабилности што доводи до смањивања продора воде до контаминаната па самим тим смањује и њихов транспорт. Обично је главни циљ солидификације да се отпад претвори у облик који је лакши за руковање и одлагање, уз истовријемено минимизовање штетног потенцијала смањивањем површине отпада која је у контакту са животном средином [6].

Сем тога, солидификован отпад смањује ризик од расипања честица отпада током руковања, чувања, транспорта и одлагања и самим тим повећава безбједност како радника који долазе у контакт са отпадом тако и безбедност животне средине. Солидификација доприноси повећању чврстине и смањењу пермеабилности у односу на нетретирано отпад. Чврсти облик који се добија солидификацијом може бити у форми монолитног блока или чврстих пелета (куглица).

Стабилизација се односи на технику која смањује ризични потенцијал отпада тако што конвертује контаминанте у мање растворне и мање мобилне па самим тим мање доступне. Ово се постиже хемијским и/или физичким процесима, а ове промјене су већим дијелом резултат високе рН вриједности која је условљена додатком везивних средстава, као што су креч и портланд цемент, што условљава пресипитацију многих контаминаната. На примјер, нетоксични сулфиди, хидроксиди и фосфати се често користе у адитивима и везивима како би превели високо растворне соли и оксиде метала (нпр. CdCl_2 , HgSO_4) који се налазе у отпаду у релативно нерастворна једињења (нпр. $\text{Cd}(\text{OH})_2$, HgS) [5]. Ипак, физичка природа и карактеристике отпада не морају се обавезно промјенити под утицајем стабилизације [7].

Развој специфичних формулација за различите типове отпада почео је крајем 60-тих и почетком 70-тих година. Појам солидификације/стабилизације (C/C) је општи појам који се користи за описивање широког спектра техника које служе да трансформишу отпад у облике који ће бити мање проблематични по животну средину. Иако је C/C технологија првобитно развијена 1960-их година ради третмана нуклеарног и других врста опасног отпада, од 1980-их година ова технологија је нашла своју примјену и у третману контаминираних земљишта и седимената [8].

Ова технологија је најчешћи избор због неколико критеријума: прије свега ефективност у заштити људског здравља и животне средине, сагласност са законским регулативама и захтјевима, могућност имплементације и исплативост [9].

2.1. Дифузиони модел

ANS 16.1 тест је један од тестова излуживања у резервоару и обезбјеђује више информација о “стварној” брзини и времену ослобађања метала из солидификованих смјеша. То је семи-динамички тест који процјењује излуживање метала у дифузионо контролисаним условима. Овом методом се

може одредити кумулативна количина метала која се излужује из солидификованих смјеша у току одређеног времена. Тест који се заснива на овом принципу је још и NEN 7345.

Процјена дугорочног модела излуживања метала из C/C солидификованих смјеша често користи ANS 16.1 модел излуживања [10]. Овај модел користи Фикову дифузиону теорију и обезбјеђује брзину дифузије метала која може да омогући процјену ефикасности C/C третмана [11, 12, 13].

Коришћењем овог модела можемо израчунати стварне дифузионе коефицијенте метала у C/C смјешама на следећи начин:

$$De = \pi \left[\frac{\frac{a_n}{A_0}}{(\Delta t)_n} \right]^2 \left[\frac{V}{S} \right]^2 T_n \quad (1)$$

гдје је:

- a_n губитак контаминанта (mg) током одређеног периода излуживања са индексом n ,
- A_0 је почетна концентрација контаминанта у узорку (mg), $(\Delta t) = t_n - t_{n-1}$,
- V је запремина узорка (cm^3),
- S је геометријска површина узорка израчуната из димензија (cm^2),
- T_n је вријеме (s) у периоду излуживања,
- De је стварни дифузиони коефицијент (cm^2/s).

Због тога што дифузија заузима мјесто у интерстицијалној течности порозног тијела, De вриједности из претходне једначине се сматрају “стварнима”.

Када одредимо De вриједности коришћењем претходне једначине можемо одредити и индекс излуживања LX који је негативни логаритам стварног коефицијента дифузије. Вриједност LX дата је следећом једначином [11, 12, 13].

$$LX = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m [-\log(De)]_n \quad (2)$$

гдје је:

- n број одређених периода излуживања,
- m је укупан број појединачних периода излуживања.

LX вриједности се могу узети као критеријум за коришћење и одлагање C/C третираног отпада [14]:

- За LX вриједности изнад 9, третман се сматра ефикасним и C/C третиран отпад адекватан за “контролисану употребу”, на примјер рехабилитацију каменолома, затварање лагуна, основа за путеве,
- За LX вриједности између 8 и 9, C/C третиран отпад може се одлагати у санитарне депоније,
- За LX вриједности мањим од 8 C/C отпад се сматра неадекватним за одлагање.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДИО

3.1. Имобилизациони агенси коришћени за солидификацију/стабилизацију

За имобилизацију узорака јаловине коришћени су следећи имобилизациони агенси: Састав зеолита (Фабрика глинице „Бирач“ Зворник) био је следећи: (% масени):

SiO_2 (66,9), Al_2O_3 (13,5), Fe_2O_3 (0,98), MgO (0,69), CaO (3,85), K_2O (0,54), Na_2O (0,37), SO_3 (1,18) и губитак жарењем (19,8).

Састав коришћеног креча: CaO (99 %).

3.2. Припрема C/C смјеша и тест излуживања

Јаловина је најприје осушена на 105 °C, а затим мјешана са имобилизационим агенсима према шеми представљеној у табели 1.

Након хомогенизације смјеша, свакој смјеши је додат оптимални садржај воде према процедури ASTM D1557-00, смјеше су затим компактиране у складу са ASTM D1557-00 методом, обезбјеђујући притисак од 2700 kN·m/m³. Затим, смјеше су смјештене у инертне пластичне врећице и тако припремљени узорци остављени да се стабилизују 28 дана на температури од 20 °C. Након овог времена, у свим смјешама је анализиран псеудо-укупни садржај метала. Из смјеша су исјечени узорци тако да се добију коцке димензије ивица 3±0,3cm, па су затим подвргнуте модификованом семи-динамичком ANS 16.1 тесту.

Табела 1. Састав смјеша јаловине и имобилизационих агенаса

Смјеша	Маса (g)		
	Зеолит	Креч	Јаловина
Z20	120	-	480
Z30	180	-	420
Z50	300	-	300
L20	-	120	480
L30	-	180	420
L50	-	300	300
L10Z10	60	60	480
L10Z20	120	60	420
L10Z30	180	60	360

Коришћењем овог теста могу се израчунати стварни дифузиони коефицијенти метала у C/C смјешама. Овај тест је изведен на собној температури са дејонизованом водом као агенсом за излуживање. Узорци су смјештени у инертне пластичне мрежице и постављени у viseћем положају у пластичну посуду са дестилованом водом, при чему је однос течност/чврсто (L/S) био 10:1 (L/kg). Тест је рађен под семидинамичким условима при чему је монолит потапан у свјеж раствор дестиловане воде након 2, 7, 24, 48, 72, 96, 120, 456, 1128 и 2160 сати, а у раствору након излуживања и филтрирања на мембранском филтеру (0,45 µm) одређивана је концентрација метала AAS (Perkin Elmer AAnalyst™ 700) и ICP-MS (Perkin Elmer Sciex Elan 5000) техником.

4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

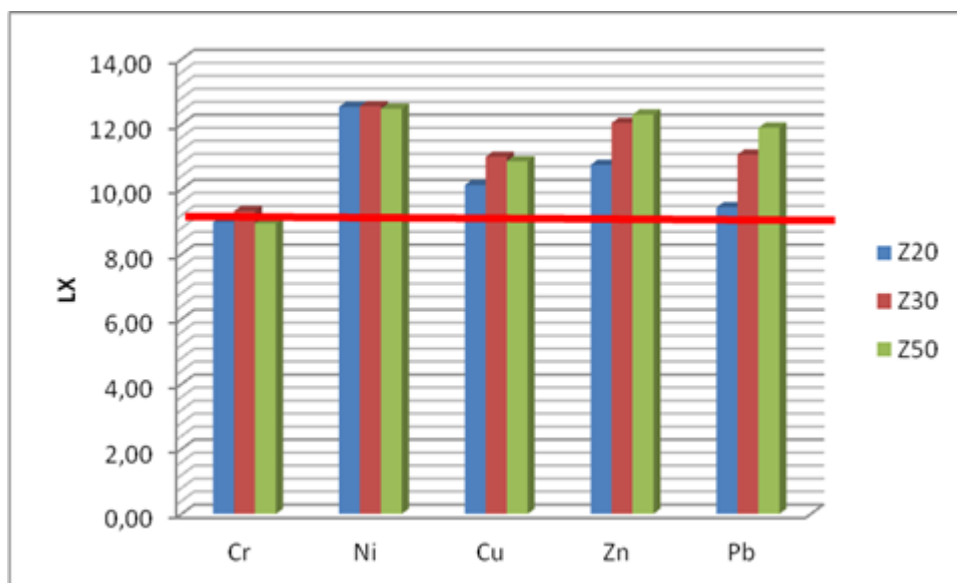
Средње вриједности дифузионих коефицијената и индекса излуживања (LX) за смјеше са зеолитом су приказане у табели 2 и на слици 1. Средње вриједности коефицијената дифузије за третиране узорке су се кретале од 1,15E-09 cm²s⁻¹ до 4,44E-12 cm²s⁻¹.

Табела 2. Средњи дифузиони коефицијент De (cm^2s^{-1}) метала из C/C смјеша са зеолитом

	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
Z20	4,10E-09	1,31E-12	3,61E-10	1,07E-10	1,15E-09
Z30	2,08E-09	1,25E-12	3,61E-11	3,13E-12	2,50E-11
Z50	4,96E-09	1,51E-12	4,68E-11	2,25E-12	4,44E-12

Коефицијенти дифузије метала из C/C смјеша се генерално крећу од вриједности за веома мобилне метале (око $1\text{E-}05 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$) до $1\text{E-}15 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (практично имобилисани метали у C/C смјешама) [15].

На основу тога се може закључити да су Ni и Zn у свим смјешама практично имобилисани (коефицијенти дифузије од $\text{E-}10$ до $\text{E-}12 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$). Док су Cr и Pb умјерено мобилни (коефицијенти дифузије од $\text{E-}09$ до $\text{E-}11 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$). Најмање мобилни метали су у смјешама са 50% зеолита са индексима излуживања у опсегу од $4,96\text{E-}09 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ до $4,44\text{E-}12 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.



Слика 1. Средњи индекси излуживања (\overline{LX}) у смјешама јаловине и зеолита; (—) LX критеријум за ефикасност третмана

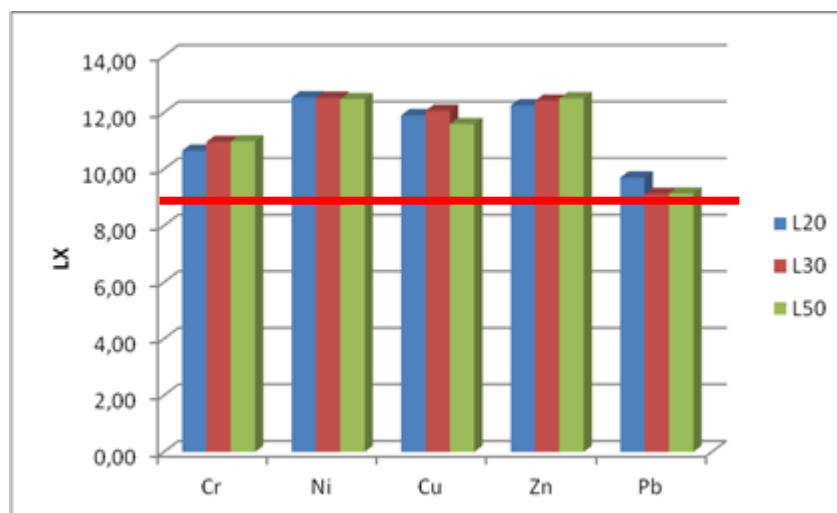
Са слике 1. се може уочити да су LX вриједности за све испитиване метале изнад 9, што значи да се ове смјеша могу контролисано употребљавати, јер у потпуности задовољавају овај критеријум.

Средње вриједности дифузионих коефицијената и индекса излуживања за смјеша са кречом су приказане у табели 3 и на слици 2. Средње вриједности коефицијената дифузије за третиране узорке су се кретале од $1,23\text{E-}09 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ до $9,69\text{E-}12 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.

Табела 3. Средњи дифузиони коефицијент De (cm^2s^{-1}) метала из C/C смјеша са кречом

	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
L20	6,72E-11	1,26E-12	6,46E-12	2,12E-12	3,40E-09
L30	4,79E-11	1,30E-12	6,13E-12	1,90E-12	3,35E-09
L50	5,08E-11	1,45E-12	9,69E-12	1,85E-12	2,23E-09

Сви испитивани метали у свим испитиваним смјешама се могу сматрати скоро потпуно имобилисаним са коефицијентима дифузије мањим од $\text{E-}10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, осим Pb у смјешама са кречом који се може сматрати умјерено мобилним са коефицијентом дифузије реда $\text{E-}09 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.



Слика 2. Средњи индекси излуживања (\overline{LX}) у смјешама јаловине и креча;
(—) LX критеријум за ефикасност третмана

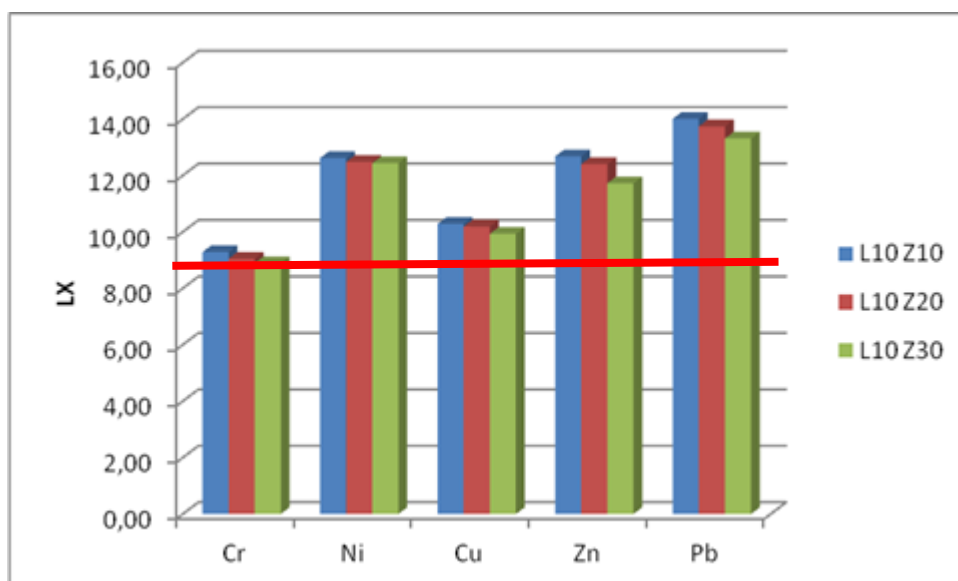
Са слике 2. се може закључити да се све смјеше са аспекта свих испитиваних метала могу контролисано употребљавати, са индексима излуживања већим од 9.

Средње вриједности дифузионих коефицијената и индекса излуживања (LX) за смјеше са комбинацијом креча и зеолита су приказане у табели 4 и на слици 3. Средње вриједности коефицијената дифузије за третиране узорке су се кретале од $1,04E-09 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ до $5,85E-14 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.

Табела 4. Средњи дифузионни коефицијент $De (\text{cm}^2 \text{ s}^{-1})$ метала из C/C смјеша са комбинацијом креча и зеолита

	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
L10 Z10	1,95E-09	1,13E-12	3,64E-10	1,43E-12	2,41E-14
L10 Z20	2,66E-09	1,48E-12	4,16E-10	2,01E-12	5,85E-14
L10 Z30	3,88E-09	1,64E-12	1,04E-09	6,26E-12	2,09E-13

Ni, Zn и Pb у свим испитиваним смјешама се могу сматрати скоро потпуно имобилисаним са коефицијентима дифузије мањим од $E-10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, као и Cu осим у смјеши 10% креча и 30% зеолита који се може сматрати умјерено мобилним са коефицијентом дифузије $1,04E-09 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. Умјерено мобилни је Cr (коефицијенти дифузије су реда $E-09 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$).



Слика 3. Средњи индекси излуживања (\overline{LX}) у смјешама јаловине и зеолита и креча;
(—) LX критеријум за ефикасност третмана

Са слике 3. се може закључити да се све смјеше са аспекта свих испитиваних метала могу контролисано употребљавати, са индексима излуживања већим од 9.

5. ЗАКЉУЧАК

У раду је испитивана потенцијална мобилност и биодоступност метала из контаминираних јаловина након њене ремедијације примјеном технике С/С (солифидификације/стабилизације) са различитим имобилизационим агенсима (зеолит и креч). Да би се испитао утицај високих и ниских концентрација метала у контаминираној јаловини и употребљених имобилизационих агенаса одабрана је јаловина из рудника олова и цинка „Сасе“ Сребреница.

У смјешама *јаловине и зеолита* долази до смањења мобилности метала: $\text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Pb}$. Најмање мобилни метали су у смјешама са 50% зеолита. Са аспекта LX вредности све се смјеше могу контролисано употребљавати јер су вриједности LX за све метале изнад 9.

У смјешама *јаловине и креча* се може се уочити сљедеће смањење мобилности: $\text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Cu}$. Најмање мобилни метали су у смјешама са 20% креча. Са аспекта LX вриједности све се смјеше могу контролисано употребљавати јер су вриједности LX за све метале изнад 9.

У смјешама *јаловине са кречом и зеолитом* се може уочити сљедеће смањење мобилности: $\text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Pb}$. Судећи по коефицијентима дифузије Ni, Zn и Pb у свим испитиваним смјешама се могу сматрати скоро потпуно имобилисаним, као и Cu осим у смјеши 10% креча и 30% зеолита који се може сматрати умјерено мобилним. Умјерено мобилни је Cr (коефицијенти дифузије су реда $\text{E-}09 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$). Са аспекта LX вриједности све се смјеше могу контролисано употребљавати јер су вриједности LX за све метале изнад 9.

Треба закључити да једноставан приступ и само један приступ није довољан у оцјени квалитета третиране јаловине. Поред тестова екстракције, неопходна је и секвенцијална екстракциона анализа која може јасније дефинисати начин везивања метала за поједине фракције у седименту што ће много помоћи за тачније предвиђање њихове мобилности, потенцијалне токсичности и биодоступности. Да би била успјешна примјена ових метода потребна су даља испитивања у смјеру детаљнијег проучавања квалитета третиране јаловине, као и планирање процеса ремедијације.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Belevi, H., Baccini, P., (1989), Long-term behavior of municipal solid waste landfills, Waste management and Research 7, 43-56
- [2] Kylefors, K., Lagerkvist, A., (1997), Changes of leachate quality with degradation phases and time, In: Christensen, T.H., Cossu, R., Stegmann, R. (Eds.) Sixth International Landfill Symposium, Italy, 2(5), 133-149
- [3] Kylefors K., Andreas L., Lagerkvist A., (2002), A comparison of small-scale, pilot-scale and large-scale tests for predicting leaching behaviour of landfilled wastes, Division of Waste Science and Technology, Luleå University of Technology, SE 971 87, Luleå, Sweden
- [4] Dalmacija B, Agbaba, J., D. (2008) Zagađujuće materije u vodenom ekosistemu i remedijacioni procesi, PMF Novi Sad
- [5] Maio, V.C. (2001). Overview of Mixed Waste Solidification and Stabilization Methods, in: Oh, Chang H., Hazardous and Radioactive Waste Treatment Technologies Handbook, CRC Press.
- [6] Santanu P., Pak, K., Yuet, N. (2006) Solidification/Stabilization of Organic and Inorganic Contaminants using Portland Cement: A Literature Review. Environmental Reviews 14, 217-255.
- [7] Conner, J.R., Hoeffner, S.L. (1998). The history of stabilisation/solidification technology. Critical reviews in Environmental Science and Technology 28, 325–396.
- [8] Laugesen, J. (2007) Behaviour of solidified/stabilized contaminated sediments in confined disposal facilities (CDFs), Doctoral thesis, Faculty of Engineering and Technology – Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- [9] Spence, R.D. i Shi, C. (2005) Stabilization and solidification of hazardous, radioactive and mixed wastes, Boca-Raton, FL: CRC Press.

- [10] ANS (American National Standard) ANSI/ANS-16.1. (1986). American National Standard for the Measurement of the Leachability of Solidified Low-Level Radioactive Wastes by a Short-Term Tests Procedure. ANSI/ANS-16.1. American National Standards Institute, New York, NY.
- [11] Dermatas, D., Moon, D.H., Menounou, N., Meng, X. i Hires, R. (2004) An evaluation of arsenic release from monolithic solids using a modified semi-dynamic leaching test, *Journal of Hazardous Materials* B116, 25-38.
- [12] Moon, D.H., Dermatas, D. (2006). An evaluation of lead leachability from stabilized/solidified soils under modified semi-dynamic leaching conditions. *Engineering Geology* 85, 67–74.
- [13] Kundu, S., Gupta, A.K. (2008). Immobilization and leaching characteristics of arsenic from cement and/or lime solidified/stabilized spent adsorbent containing arsenic. *Journal of Hazardous Materials* 153, 434–443.
- [14] Environment Canada (1991). Proposed Evaluation Protocol for Cement-Based Solidified Wastes, Environmental Protection Series, Report No. EPS 3/HA/9.
- [15] Nathwani, J.S., Phillips, C.R. (1980). Leachability of Ra-226 from uranium mill tailings consolidated with naturally occurring materials and/or cement: II. Analysis based on mass transport equation. *Water, Air and Soil Pollution* 14, 389–402.