



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ПРИРОДНО – МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ  
ДЕПАРТМАН ЗА ФИЗИКУ



# **Процјена радиолошког ризика у близини одлагалишта фосфогипса помоћу ERICA програма**

*мастер рад*

Ментор: Проф. др Наташа Тодоровић  
Коментор: Доц. др сц. Марина Поје-Совиљ

Студент: Николина Тодоровић  
Број индекса: 255м/22

*Нови Сад, 2024.*

*Желим да изразим дубоку захвалност свима који су на одређени начин допринјели изради овога рада, првенствено мојим менторима проф. др Наташи Тодоровић и доц. др Марини Поје-Совиљ, без чије помоћи и савјета процес израде овога рада не би био могућ, а затим и породици и пријатељима на неизмјерној подршци.*

## Садржај:

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Увод .....                                                                                 | 1  |
| 2. Извори јонизујућег зрачења .....                                                           | 2  |
| 2.1 Радиоактивност .....                                                                      | 2  |
| 2.2 Јонизујуће зрачење .....                                                                  | 3  |
| 2.3 NORM и TENORM материјали .....                                                            | 4  |
| 2.4 Радионуклиди од значаја при процјени ризика на одлагалиштима<br>фосфогипса .....          | 5  |
| 2.5 Фосфогипс .....                                                                           | 7  |
| 2.5.1 Добијање .....                                                                          | 7  |
| 2.5.2 Физичке и хемијске карактеристике фосфогипса .....                                      | 8  |
| 2.5.3 Радиолошке карактеристике фосфогипса .....                                              | 8  |
| 2.5.4 Уобичајене праксе одлагања и еколошки проблеми .....                                    | 10 |
| 3. Биолошки ефекти јонизујућег зрачења .....                                                  | 11 |
| 3.1 Дозиметријске величине и јединице .....                                                   | 11 |
| 3.2 LET и RBE .....                                                                           | 13 |
| 3.3 Дејство јонизујућег зрачења на ДНК и ћелију .....                                         | 14 |
| 3.4 Класификација биолошких ефеката јонизујућег зрачења .....                                 | 16 |
| 3.5 Биолошки ефекти јонизујућег зрачења на екосистеме .....                                   | 17 |
| 4. ERICA програм .....                                                                        | 19 |
| 4.1 Процјена .....                                                                            | 19 |
| 4.2 Актери .....                                                                              | 20 |
| 4.3 Формулација проблема .....                                                                | 21 |
| 4.4 Одабир екосистема, радионуклида и референтних организама .....                            | 22 |
| 4.5 Параметри преноса у ERICA програму .....                                                  | 25 |
| 4.6 Одређивање односа концентрација .....                                                     | 26 |
| 4.7 Прорачун брзине дозе .....                                                                | 28 |
| 4.8 Рангови ( $T_1$ , $T_2$ , $T_3$ ) .....                                                   | 31 |
| 4.9 Анализа осјетљивости .....                                                                | 32 |
| 4.10 Биолошки ефекти и њихова веза са брзином дозе .....                                      | 33 |
| 4.11 Разматрања након процјене .....                                                          | 34 |
| 5. Припрема узорака, методе и резултати мјерења .....                                         | 36 |
| 5.1 Припрема узорака .....                                                                    | 36 |
| 5.2 Одређивање садржаја радионуклида у узорцима фосфогипса .....                              | 37 |
| 5.3 Резултати мјерења .....                                                                   | 39 |
| 6. Процјена ризика .....                                                                      | 41 |
| 6.1 Процјена ризика и тумачење добијених резултата у случају слатководног<br>екосистема ..... | 41 |
| 6.2 Процјена ризика и тумачење добијених резултата у случају копненог<br>екосистема .....     | 52 |
| 7. Закључак .....                                                                             | 61 |
| 8. Литература: .....                                                                          | 64 |

## 1. Увод

Фосфатна руда, која се користи као сировина приликом производње фосфорне киселине и вјештачких ђубрива, садржи одређене концентрације природних радионуклида као што су  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , као и потомци низова радиоактивног распада поменутих радионуклида. Иако се  $^{238}\text{U}$  углавном концентрише у самим производима, његов потомак  $^{226}\text{Ra}$ , који је један од најштетнијих природних радионуклида, се концентрише нуспроизводима, првенствено у фосфогипсу. Фосфогипс је нуспроизвод који настаје приликом производње фосфорне киселине и вјештачких ђубрива, а због високе концентрације природних радионуклида фосфогипс спада у групу технолошки побољшаних природних радиоактивних материјала (*TENORM - Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*).

Неконтролисано одлагање фосфогипса, расипање приликом транспорта, подземне воде али и временски услови као што су киша и вјетар, само су неки од начина на које фосфогипс може доспјети у екосистеме, што представља потенцијални ризик за биљне и животињске врсте тих екосистема, али и индиректно потенцијални ризик за људе, у случају да неки од контаминираних организама улазе у састав ланца исхране људи.

Постоји низ програма који се користе за процјену ризика у екосистемима, а за потребе овога рада је кориштен програм *ERICA (Environmental Risk from Ionizing Contaminants: Assessment and Management)*, верзија *ERICA 2.0*. Овај програм представља софтверски систем, чија се структура базира на истоименом интегрисаном приступу процјене радиобиолошког ризика за биодиверзитет, а служи за навођење корисника кроз процес процјене, као и за документовање информација и донесених одлука.

Процјена је вршена за референте организме слатководног и копненог екосистема, карактеристичне за одлагалиште фосфогипса у околини Прахова. Вриједности концентрација активности, појединачних радионуклида који су од значаја за процјену ризика, а које представљају полазне тачке процјене ризика су преузете из докторске дисертације ''*Корелација радиолошких и структурних карактеристика грађевинских материјала*'', чији је аутор др Предраг Кузмановић. [Kuzmanović, 2020-2]

## 2. *Извори јонизујућег зрачења*

### 2.1 *Радиоактивност*

Појам радиоактивност се односи на природну појаву, која подразумева да, из нестабилних атомских језгара, спонтано долази до емисије енергије у виду зрачења. Атомско језгро емитује зрачење и трансформише се у ново језгро, које називамо потомком.

Радиоактивност је, 1896. године, открио Анри Бекерел, и то тако што је проучавао карактеристике  $X$ -зрака, које је, 1895. године, открио Вилхелм Рендген. Бекерел је сунчевој свјетлости излагао калијум уранил сулфат, а затим би га постављао на фотографске плоче које су биле умотане у црни папир. Он је сматрао да уран апсорбује зрачење које потиче од Сунца, ослобађајући га у виду  $X$ -зрака. Он је својим експериментима показао да спољашњи извор енергије, као што је Сунце, није потребан да би уран емитовао зрачење. Бекерел долази до открића да емитовано зрачење скреће када се нађе у магнетном пољу, што је значило да је ово зрачење наелектрисано, за разлику од  $X$ -зрака. Постављањем различитих радиоактивних супстанци у магнетно поље долази до закључка да можемо говорити о три врсте честица: позитивно наелектрисаним, негативно наелектрисаним и неутралним. Бекерел је зрачење које је открио назвао *уранијумовим зрацима*, а осим овога термина кориштен је и термин *Бекерелови зраци*. [СРЕР, 2018]

Термин *радиоактивност* званично уводи Марија Кири, која је заједно са својим мужем Пјером почела да проучава појаву коју је открио Бекерел. Марија Кири своје проучавање започиње у децембру 1897. године. Она је проучавала карактеристике различитих елемената, хемијских једињења и минерала, све у циљу испитивања да ли можда постоје елементи који се понашају на сличан начин као уранијум. Првенствено је открила да торијум показује сличне карактеристике као и уранијум, а затим и да уранијумови минерали, пичбленда и халколит, показују много већи ниво радиоактивности у односу на чист уранијум. Кири долази до закључка да ови минерали садрже, до тада, непознат елемент. Пјер Кири се у овом тренутку прикључује својој жени, и заједничким радом долазе до закључка да новооткривени елемент показује карактеристике које су, у одређеној мјери, сличне бизмуту. Новооткривени елемент добија назив полонијум. Међутим, и када су из раствора пичбленде уклонили бизмут и полонијум, раствор је и даље био радиоактиван, што је значило да пичбленда садржи још један радиоактивни елемент. Касније се показало да су карактеристике овога елемента сличне карактеристикама баријума а он добија назив радијум. [Radvanyi, 1996]

Ернест Радерфорд, такође, почиње да се бави проучавањем радиоактивности. Он је извршио велики број експеримената чији је циљ био проучавање својстава радиоактивног распада, увео је појам алфа, бета и гама честица и исте класификовао на основу њихове способности продирања кроз различите материјале. Он је 1899. године открио да радиоактивни елементи емитују двије врсте зрачења, које назива алфа и бета зрацима, а касније, заједно са Полом Виларом долази до открића да постоји и трећи тип зрачења, и овај тип зрачења добија назив гама зраци. Можда и најзначајније Радерфордово откриће, јесте постојање атомског језгра, до кога долази извођењем експеримената који су подразумевали расијање алфа честица. Заједно са Фредериком Содијем, Радерфорд развија модел радиоактивног распада и представља моделе трансформације атомских језгара. Радефорд се бавио мјерењем времена полураспада различитих радиоактивних елемената, што је омогућило боље разумијевање стабилности тих елемената. [Radvanyi, 1996]

Неки сегменти наших живота би данас били незамисливи без радиоактивности, наиме, радиоактивност је нашла примјену у многобројним сегментима наших живота, као што су: медицина, индустрија, енергетика и сл. Међутим, њено неконтролисано ослобађање може да представља велики ризик како за људе, тако и за околину. Безбједна употреба радиоактивних материјала је обезбијеђена низом регулација и мјера заштите. Када је ријеч о савременим истраживањима, њихов циљ је боље разумијевање природе радиоактивности, унапрјеђење мјера заштите и мјера за управљање радиоактивним отпадом, али и развој технологија које би имплементирале радиоактивност.

## 2.2 Јонизујуће зрачење

Јонизујуће зрачење представља наелектрисане честице (тешке и лаке) и електромагнетно зрачење (фотоне). Јонизација је процес који подразумева да при проласку јонизујућег зрачења кроз материју долази до интеракције јонизујућег зрачења са атомима и молекулима те материје и настанка позитивно или негативно наелектрисаних јона. Разликујемо директно јонизујуће и индиректно јонизујуће зрачење. Директно јонизујуће зрачење представља наелектрисане честице које своју енергију директно предају материји кроз коју пролазе и на тај начин врше јонизацију, док индиректно јонизујуће зрачење представља ненаелектрисане честице које не могу директно да врше јонизацију, већ првенствено стварају секундарне наелектрисане честице, које даље врше јонизацију. Разликујемо спољашње и унутрашње изворе јонизујућег зрачења, а према поријеклу извора зрачења можемо их касификовати на следећи начин:

- Природни извори зрачења:
  1. Космичко зрачење
  2. Космогени радионуклиди  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$
  3. Радионуклиди земаљског поријекла: радионуклиди из низова распада  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , и остали природни радионуклиди ван низова распада:  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{115}\text{Ln}$  и  $^{138}\text{La}$
- Извори зрачења настали људском активношћу и NORM (TENORM):
  1. Космичко зрачење у аеротранспорту
  2. Радионуклиди који настају сагоријевањем угља, нафте и гаса
  3. Радионуклиди који се распоређују грађевинским материјалом и рударском дјелатношћу, укључујући NORM појачане технолошким процесима (TENORM)
  4. Радионуклиди у вјештачким ђубривима
  5. Радионуклиди у концентрованим производима ветеринарског надзора
  6. Радионуклиди у предметима широке потрошње
  7. Радионуклиди у затвореним просторијама (радон и зрачење из грађевинских материјала)
- Вјештачки генерисани извори зрачења:
  1. Радионуклиди који потичу из нуклеарних експлозија

2. Нуклеарни објекти и погони
3. Извори зрачења у медицинској радиологији
4. Извори зрачења у индустрији
5. Извори јонизујућег зрачења у јавној употреби [Kuzmanović, 2020-2]

### 2.3 NORM и TENORM материјали

Појам природно зрачење се односи на космичко зрачење и зрачење које потиче од распада природно присутних радионуклида. Као што је већ поменуто, природни радионуклиди подразумевају примордијалне радиоактивне елементе који се налазе у Земљиној кори, радиоактивне продукте њиховог распада и радионуклиде који поријекло воде од космичког зрачења. Вријеме полуживота примордијалних радионуклида је упоредиво са старошћу Земље. Космогени радионуклиди настају у интеракцијама стабилних радионуклида и космичких зрака, и то углавном у атмосфери. [NRC Comitee, 1999]

У контексту заштите од јонизујућег зрачења су најзначајнији радионуклиди природног поријекла из низова распада:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , као и примордијални радионуклид  $^{40}\text{K}$ . Концентрације ових радионуклида обично нису толико велике да би представљале потенцијални ризик, али одређене активности могу бити узрок излагања која захтијевају доношење прописа, све како би оваква излагања била контролисана. NORM (*Naturally Occuring Radiactive Materials*) материјали представљају материјале који садрже радионуклиде природног поријекла и могу бити узрок потенцијалних излагања зрачењу, при чему су поменута излагања већа у односу на нормалне нивое изложености. Како су рударске дјелатности и прерада уранове руде процеси директно повезани са радиоактивношћу у руди, током историје је пажња већинским дијелом била усмјерена на њих. Међутим, широм свијета се, у последњих двадесетак година, уводе мјере за контролу излагања обухваћених широким спектром природних извора, нарочито минералима и сировинама који нису у вези искључиво са екстракцијом уранијумове руде. Два документа од кључног значаја, који садрже одредбе о мјерама заштите професионално изложених лица и јавности, су: Међународни основни безбједоносни стандарди за заштиту од јонизујућег зрачења и безбједност извора зрачења (IAEA Safety Series No. 115) и Директива Еврпског савјета 96/29/Euratom (13. мај 1996.). [IAEA, 2007]

NORM материјали представљају изворе ниских доза јонизујућег зрачења, како за људе, тако и за животну средину, а мјерење њихових концентрација активности је јако важно при процјени укупне изложености природној радиоактивности. Радиоактивни распада ових материјала служе за одређивање старости стијена и минерала, па можемо рећи да NORM материјали имају значајну улогу у геолошким и геохролошким методама датирања. Концентрације активности NORM материјала које су повишене говоре да, потенцијално, постоји контаминација узрокована људским активностима, па мјерење концентрације активности у овом случају омогућава праћење и контролу нивоа радиоактивности у околини.

TENORM (*Tehnologically Enchanced Naturally Occuring Radiactive Materials*) материјали представљају материјале који садрже природне радиоактивне елементе, чија је концентрација повећана и то људским активностима и различитим технолошким процесима. Повећана концентрација активности коју садрже ови материјали представља потенцијални ризик за људе, али и за околину, па ови материјали захтијевају доношење одговарајућих мјера при руковању, транспорту, обради и одлагању. Ови материјали настају као нуспроизвод или отпад у различитим

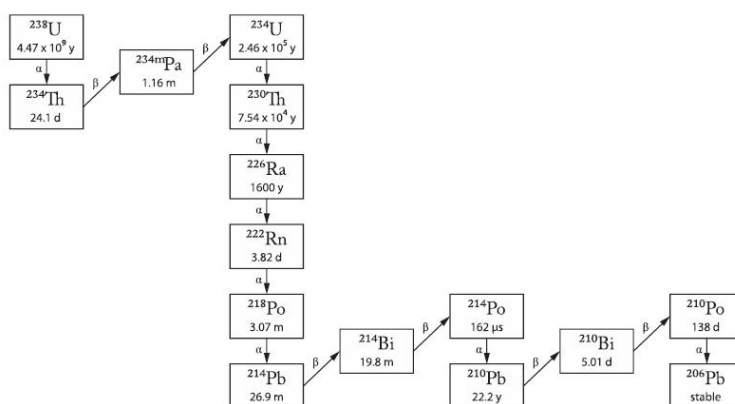
индустријским процесима (рударство, производња фосфата, индустрија нафте и гаса). Пошто фосфатни минерали садрже уранијум, приликом производње фосфата долази до преноса радионуклида који су саставни чланови уранијумовог радиоактивног низа на нуспроизводе и ђубрива, па они, у овом случају, представљају TENORM материјале. Један од нуспроизвода који настаје приликом производње фосфорне киселине је и фосфогипс. [NRC Comitee, 1999]

Назив TENORM је раније био у употреби али је према новијим препорукама IAEA-е овај назив избачен из употребе, и једноставно се користи само назив NORM. [Gillot et al., 2006]

## 2.4 Радионуклиди од значаја при процјени ризика на одлагалиштима фосфогипса

У наставку рада ће бити ријечи о хемијском саставу, физичким и радиолошким карактеристикама фосфогипса. Укратко, фосфогипс може да садржи различите радионуклиде, као што су:  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и други. Присуство и садржај одређене врсте радионуклида у фосфогипсу зависи од многобројних фактора, као што су: састав полазне фосфатне руде, садржај уранијума, торијума и продуката њиховог распада у полазној руди, начин добијања фосфорне киселине, температура и притисак. Радионуклиди од значаја за овај рад су:  $^{226}\text{Ra}$  (који је члан радиоактивног низа уранијума  $^{238}\text{U}$ ),  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ .

Примордијални уранијум се налази у природи, и то у облику два изотопа  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ . Уранијумов изотоп  $^{238}\text{U}$  чини чак 99.27% уранијума, по маси, у Земљиној кори, док уранијум  $^{235}\text{U}$  чини тек 0.72% уранијума, по маси. Краткоживећи производ уранијумовог низа,  $^{234}\text{U}$ , је најчешће у радиоактивној равнотежи са претком, или је близу те равнотеже. Типичне концентрације активности уранијума у уобичајеним врстама стијена се крећу од  $7 \text{ Bq kg}^{-1}$  до  $60 \text{ Bq kg}^{-1}$ . Приликом екстракције и прераде материјала који нису примарно радиоактивни (ниво радиоактивности није толико висок да би материјал представљао ризик и захтијевао посебне мјере, у смислу руковања и одлагања услед своје радиоактивности), може доћи до настанка нуспроизвода који садрже повећану концентрацију активности радионуклида. Примјер оваког материјала је фосфатна руда, која може да садржи уранијум у концентрацијама и до 120ppm (part per million). [NRC Comitee, 1999]



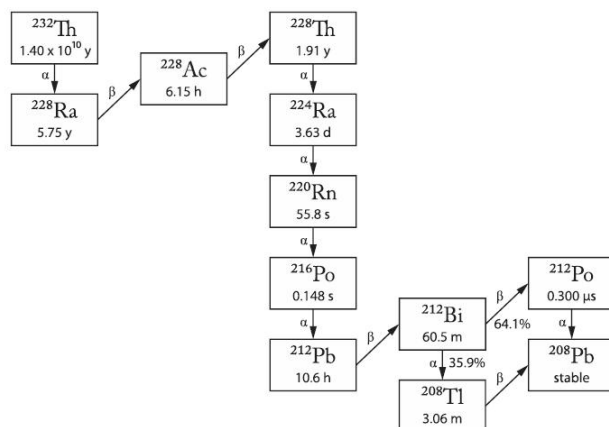
Слика 1. Низ распада  $^{238}\text{U}$  [Kuzmanović, 2020-2]

Природни уранијум је већинским дијелом сачињен од  $^{238}\text{U}$ , док је удио уранијума  $^{235}\text{U}$  тек 0.73%. Сваки члан низа распада уранијума  $^{238}\text{U}$  је нестабилан и распада се алфа или



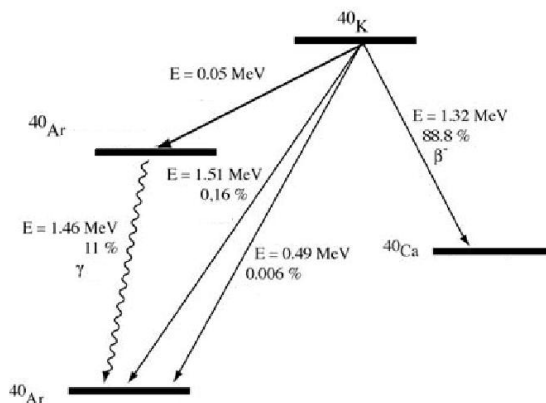
бета распадом, све док не настане стабилан изотоп  $^{206}\text{Pb}$ . Низ уранијума  $^{235}\text{U}$  завршава стабилним изотопом  $^{207}\text{Pb}$ . Уранијум је саставни дио минерала као што су: уранинит, аутунит, давидит и тобернит, али га је могуће пронаћи и у пијеску фосфата, лигнита и моноазита, из којих се комерцијално експлоатише. Важан члан низа  $^{238}\text{U}$  је радијум  $^{226}\text{Ra}$ , чијим распадом настаје радон  $^{222}\text{Rn}$ . Највише концентрације  $^{226}\text{Ra}$  су измјерене у гранитним стијенама и NORM материјалима (фосфогипс, шљака из високих пећи и пепео настао приликом сагоријевања угља). [Kuzmanović, 2020-2]

Торијум  $^{232}\text{Th}$  представља природни радионуклид, а саставни је дио минерала торит торијанит. Један од изотопа који настају распадом  $^{232}\text{Th}$  је радиоактивни гас  $^{220}\text{Rn}$ , познатији као торон. Торијум  $^{232}\text{Th}$  у одређеном постотку можемо пронаћи и у грађевинским материјалима минералног поријекла. [Kuzmanović, 2020-2]



Слика 2. Низ распада  $^{232}\text{Th}$  [Kuzmanović, 2020-2]

У природи постоје три изотопа калијума:  $^{37}\text{K}$ ,  $^{39}\text{K}$  и  $^{40}\text{K}$ , при чему је само  $^{40}\text{K}$  нестабилан. Он се распада бета распадом на калцијум  $^{40}\text{Ca}$  и електронским захватом на аргон  $^{40}\text{Ar}$  уз емисију гама зрачења енергије 1.46 MeV. Удио  $^{40}\text{K}$  у природном калијуму износи 0.0117%, од укупне масе калијума. Осим што је заступљен у стијенама, базалтима, пијеску, граниту и води,  $^{40}\text{K}$  је доминантна радиоактивна компонента у храни коју конзумирамо и људском ткиву. Тијело особе чија је тјелесна маса 40 kg садржи отприлике 140 g калијума, и то највећим дијелом у мишићима. Процјењује се да је годишња доза која потиче од овога радионуклида 0.18 mSv меким ткивима и 0.14 mSv костима. [NRC Comitee, 1999]



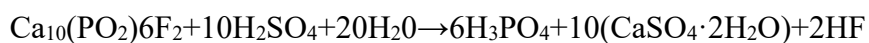
Слика 3. Шема распада  $^{40}\text{K}$  [Gillot et al., 2006]

## 2.5 Фосфогипс

Фосфогипс је нуспроизвод који настаје приликом производње фосфорне киселине и вјештачких ђубрива, и то путем два процеса, и то су: влажни и термални. Што се хемијског састава тиче, фосфогипс је углавном сачињен од калцијум-сулфат дихидрата ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 95%), уз примјесе флуорида, фосфата и других минералних материја које зависе од сировине. Минерали и руде могу да представљају природне изворе радиоактивности. Приликом њихове индустријске прераде долази до концентрисања радионуклида у нуспроизводима. Због високе концентрације природних радионуклида фосфогипс спада у групу технолошки повећаних природних радиоактивних материјала (*TENORM - Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*). Као што је претходно поменуто, овакви радиоактивни извори су сви материјали који садрже повишене концентрације природних радиоактивних елемената, као што су уранијум, торијум и радијум, а чија се радиоактивност повећава људским активностима и индустријским процесима. [Bituh et al., 2021]

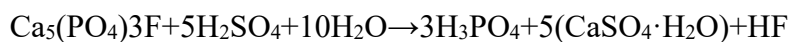
### 2.5.1 Добијање

Влажни процеси подразумевају третирање фосфатних стијена са концентрованом сумпорном киселином на температури од 75 °C до 80 °C, при чему добијамо фосфорну киселину и фосфогипс, што је могуће приказати следећом једначином [Bituh et al., 2021]:



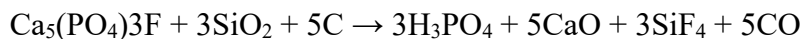
Полазна сировина је фосфатна стијена ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ ), као реагнес користимо сумпорну киселину ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) и додајемо воду која има улогу реагенса и растварача. Продукти ове реакције су: фосфорна киселина ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), калцијум-сулфат дихидрат ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) и водоник-флуорид (HF). Овај начин производње фосфорне киселине по једној тони фосфорне киселине даје између четири и шест тона фосфогипса.

При индустријској производњи фосфорне киселине, као нуспроизвод, настаје фосфогипс, што је могуће представити следећом једначином [Kuzmanović, 2020-1]:



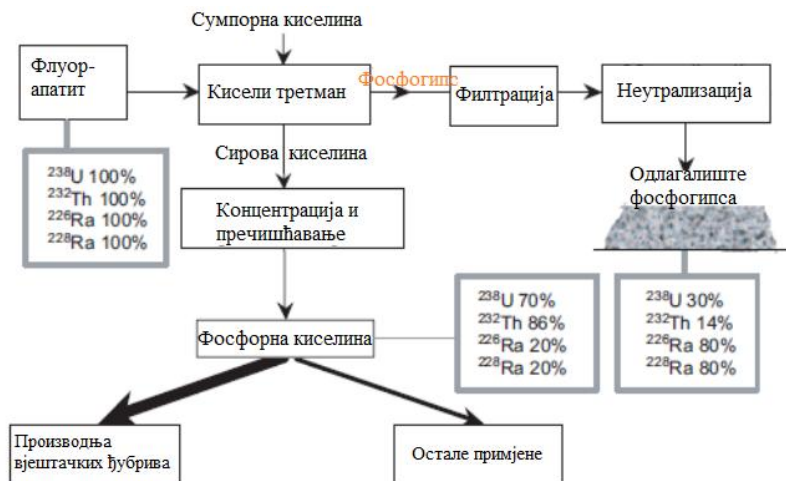
У овом случају као полазну сировину користимо флуор-апатит ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ), као реагнес користимо сумпорну киселину ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) и додајемо воду, која има улогу растварача и реагенса. Продукти реакције су исти као и у претходном случају. Главна разлика у односу на претходно приказану реакцију је састав полазне фосфатне руде. При производњи једне тоне фосфорне киселине, на овај начин, добијамо између три и пет тона фосфогипса.

Термални процес производње фосфорне киселине се обично приказује следећом једначином [Zheng, Xia and Chen, 2020]:



Реагнес који користимо у овом случају је силицијум диоксид ( $\text{SiO}_2$ ), полазна сировина је такође фосфатна стијена а као редукционо средство додајемо угљеник. За разлику од

влажног (мокрог) процеса, у термалном процесу нема потребе за додавањем воде, јер се реакција одвија на високим температурама. Продукти ове реакције су: фосфорна киселина ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), калцијум-оксид ( $\text{CaO}$ ), силицијум-тетрафлуорид ( $\text{SiF}_4$ ) и угљен-моноксид ( $\text{CO}$ ).



Слика 4. Блок шема производње фосфорне киселине [Kuzmanović, 2020-2]

### 2.5.2 Физичке и хемијске карактеристике фосфогипса

Фосфогипс је сив и влажан материјал, који има зрнасту текстуру са величином зрна између 0.5 mm и 1.0 mm. Садржај воде обично варира између 8% и 30%. Густина, чврстоћа, стишљивост и пропустљивост зависе од начина одлагања и дубине на којој се налази наслага. Густина и чврстоћа фосфогипса се са временом смањују, док се стишљивост и пропустљивост побољшавају. [Bituh et al., 2021]

Фосфогипс добијен влажном обрадом је углавном сачињен од калцијум-сулфат дихидрата ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) или калцијум-сулфат хемихидрата ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ). Неке од примјеса које може да садржи фосфогипс су:  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (ортофосфорна киселина),  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  (калцијум дихидроген фосфат),  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (калцијум хидроген фосфат дихидрат),  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  (калцијум ортофосфат), затим флуориди, сулфатни јони, метали у траговима (Cr, Cu, Zn и Cd) и одређене органске материје (амини, кетони, алифатична једињења угљеничних киселина). Фосфогипс добијен влажном обрадом садржи око 80%  $^{226}\text{Ra}$ , 30%  $^{232}\text{Th}$  и 14%  $^{238}\text{U}$ , док се остатак поменутих елемената налази у фосфорној киселини. Управо због оваквог садржаја радиоактивних елемената у фосфогипсу, постоји одређени радиолошки ризик, поготово од радијума ( $T_{1/2}=1600$  година) и производа његовог распада. Основу процедура које служе за смањење радиоактивности представља чињеница да је  $^{226}\text{Ra}$  уже повезан са ситнијим честицама хемихидрата него великим честицама дихидрата. [Bituh et al., 2021]

### 2.5.3 Радиолошке карактеристике фосфогипса

Осим што садржи производе распада  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$ , фосфогипс садржи и примордијални радиоизотоп  $^{40}\text{K}$ , а концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$  у фосфогипсу је од неколико десетина па до неколико стотина пута већа у односу на ону у природном

гипсу, што је посљедица садржаја уранијума у полазној руди. Одлагалишта фосфогипса заузимају велике површине и ремете структуру екосистема, али представљају и потенцијални радиолошки ризик за људе. У свијету се годишње произведе приближно 300 милиона тона фосфогипса, а због контаминације се тек 15% фосфогипса произведеног у свијету рециклира и користи при прављењу грађевинског материјала, док се остатак одлаже на отвореном. У Србији се на годишњем нивоу произведе око 810 000 тона отпадног фосфогипса, а тек се мали проценат од укупне производње користи за прављење цемента. [Kuzmanović, 2020-1]

Концентрација  $^{226}\text{Ra}$  у фосфогипсу се креће од  $200 \text{ Bq kg}^{-1}$  до  $3000 \text{ Bq kg}^{-1}$ . Употреба фосфогипса са повећаном концентрацијом  $^{226}\text{Ra}$  подразумева опасност од излагања гама зрачењу, али и опасност од инхалације  $^{222}\text{Rn}$  и елемената који настају његовим распадом, а представљају значајан здравствени ризик, што представља двоструки ризик за јавност, јер представља извор гама зрачења али и  $^{222}\text{Rn}$ , као и производа његовог распада.  $^{222}\text{Rn}$  је радиоактивни гас ( $T_{1/2}=3.825$  дана), лако долази до његовог ослобађања из грађевинског материјала а ми га инхалаторним путем уносимо у организам. Радон је инертан гас и као такав лако може да се креће слободно кроз порозне средине као што су грађевински материјали. Због дугог времена полуживота  $^{226}\text{Ra}$  долази до константног ослобађања  $^{222}\text{Rn}$  и његовог акумулисања, што повећава ризик од излагања већим дозама, поготово у слабо провјетреним просторима. Иако грађевински материјал није главни извор  $^{222}\text{Rn}$ , допринос укупној годишњој дози по особи, који потиче управо од  $^{222}\text{Rn}$  ослобођеног из грађевинског материјала може бити значајан. [Kuzmanović, 2020-1]

Мјерења концентрација активности радионуклида на одлагалиштима фосфогипса вршена 2015. године, која су подразумевала и узимање узорка са различитих дубина, су показала да су се концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$  кретале од  $473 \text{ Bq kg}^{-1}$  па до  $1626 \text{ Bq kg}^{-1}$ , са просјечном вриједношћу од  $811 \text{ Bq kg}^{-1}$ . [Bituh et al., 2021]

Република Србија дозвољава употребу грађевинских материјала код којих ниво радиоактивности не прелази годишњу ефективну дозу од  $1 \text{ mSv}$ . [Official Gazzete 36/18, 2018]

Табела 1. Поређење вриједности концентрација активности природних радионуклида  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у узорцима фосфогипса [Bituh, et al., 2021]

| Држава           | $^{226}\text{Ra}$ [ $\text{Bq kg}^{-1}$ ] | $^{232}\text{Th}$ [ $\text{Bq kg}^{-1}$ ] | $^{40}\text{K}$ [ $\text{Bq kg}^{-1}$ ] |
|------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Белгија          | 431                                       | 11                                        | -                                       |
| Бугарска         | 209                                       | 17                                        | 3                                       |
| Велика Британија | 1018                                      | 33                                        | 130                                     |
| Чешка Република  | 115                                       | 31                                        | 95                                      |
| Финска           | 306                                       | 23                                        | 17                                      |
| Њемачка          | 305                                       | 20                                        | 110                                     |
| Грчка            | 606                                       | 10                                        | 22                                      |
| Пољска           | 267                                       | 17                                        | 72                                      |
| Румунија         | 497                                       | 40                                        | 242                                     |
| Словенија        | 500                                       | 10                                        | 41                                      |
| Србија           | 600                                       | 3                                         | 47                                      |
| САД              | 750                                       | 1                                         | 14                                      |
| Хрватска         | 811                                       | 8                                         | 13                                      |
| Холандија        | 223                                       | 24                                        | 50                                      |

#### **2.5.4 Уобичајене праксе одлагања и еколошки проблеми**

Складиштење и рециклажа фосфогипса представљају проблеме за многе земље широм свијета, пошто одлагалишта фосфогипса имају негативан еколошки утицај у смислу да изазивају контаминацију површинских и подземних вода, земљишта и вегетативног омотача. Постоје двије врсте одлагалишта фосфогипса, и то су: отворена и затворена одлагалишта. Одлагалишта фосфогипса заузимају велике површине и обично се налазе у непосредној близини фабрика, природних комплекса или некада и насеља. Осим што одлагалишта представљају еколошки и радиолошки ризик, процес транспорта и одлагања фосфогипса представља изазов и са финансијског становишта. [Chernysh et al., 2021]

Да бисмо могли направити одлагалиште првенствено треба обезбиједити велику површину, која је обично већа од површине индустријског комплекса у коме као нуспроизвод настаје фосфогипс. Одлагалишта утичу неповољно на трансформацију екосистема а није ријетка ни ситуација да површина коју заузима одлагалиште уствари представља обрадиву површину. Одлагалишта најједноставније речено деформишу природну средину, прекидају и мијењају проток и састав супстанци у земљишту, загађују екосистем, мијењају састав подземних вода, карактер ваздушних токова и параметре као што је влажност екосистема, па можемо рећи да су она уствари сложени извори загађења. [Chernysh et al., 2021]

Фосфогипс такође садржи и тешке метале и ријетке земљане елементе, а њихова концентрација зависи од састава фосфатне стијене која је кориштена као полазна руда. Детаљна испитивања мароканских фосфатних стијена и фосфогипса, вршена у Шанији, су показала да се тек 2-12% елемената у траговима из фосфатне стијене налази у фосфогипсу, при чему су изузетак следећи елементи: Sr (66%), Се (56%), I (41%) и Pb (27%). На основу истраживања су предложена три нивоа транспорта метала, и то: високи (Sr, Zn), умјерени (As, Ba, Cd, Cr) и ниски (Cu, Ni, Pb, Se, V, Y, Zr). [Bituh et al., 2021]

Тешки метали су токсични, не разграђују се и јако дуго се могу задржати у земљишту и води. Ако се фосфогипс неадекватно одлаже или користи ови метали могу доспјети у земљиште, површинске и подземне воде, даље у организме биљака и животиња, и на тај начин врло лако постају дио ланца исхране, што говори да високе концентрације тешких метала угрожавају екосистеме и штете здрављу. Олово може изазвати оштећења нервног система, проблеме с концентрацијом, бубрезима и кардиоваскуларним системом, кадмијум је токсичан за бубреге, може узроковати болести костију и плућа, арсен је канцероген и може изазвати кожне промјене, проблеме са срцем и крвним судовима, жива може да изазове оштећења мозга, нервног система и узрокује проблеме с видом и слухом, док никл може да изазове алергије и проблеме који су у вези са дисајним системом.

С обзиром на количине фосфогипса произведеног на годишњем нивоу, како код нас, тако и у свијету, јасно је да је његово одлагање али и потенцијална примјена значајан проблем. Нека од могућих рјешења јесу да се фосфогипс користи као: адитив у керамичкој производњи, везивни материјал у грађевинској индустрији, цемент, гипсане плоче, малтер, валоризација у производњи опеке, у пољопривреди,... [Kuzmanović, 2020-2]

### 3. Биолошки ефекти јонизујућег зрачења

Екосистеми су од постанка планете Земље, у одређеној мјери, изложени утицају јонизујућег зрачења. Изложеност космогеним радионуклидима и радионуклидима присутним у геолошком слоју Земљине коре је варијала с временом, а током друге половине двадесетог вијека долази до повећања изложености јонизујућем зрачењу, при чему је ова повећана изложеност представљала посљедицу људских активности. Поменуте активности се првенствено односе на тестирање нуклеарног оружја и генерално, употребу нуклеарног оружја.

Излагања јонизујућем зрачењу могу да изазову настанак биолошких ефеката јонизујућег зрачења, а ове ефекте описујемо као промјене које јонизујуће зрачење изазива на ћелијама, ткивима и органима живих организама.

#### 3.1 Дозиметријске величине и јединице

Када је ријеч о биолошким ефектима јонизујућег зрачења на биљне и животињске врсте, дозиметријске величине од значаја су:

- Апсорбована доза ( $D$ )
- Брзина апсорбоване дозе ( $\dot{D}$ )
- Еквивалентна доза ( $H_T$ )

Апсорбована доза ( $D$ ) представља количину енергије зрачења апсорбовану у јединици масе у датом органу или цијелом организму, а одговарајућа јединица за изражавање апсорбоване дозе је греј ( $Gy$ ). Рачунамо је на основу релације [Silari, 2012]:

$$D = \frac{dE}{dm}$$

Апсорбована доза је основна величина коју користимо када желимо да процјенимо излагање јонизујућем зрачењу. Значајан допринос апробованој дози дају алфа, бета и гама зрачење. [Ulanovsky et al., 2008]

Брзина апсорбоване дозе ( $\dot{D}$ ) представља количину енергије депоновану у јединици масе материје, у јединици времена. Јединица за изражавање брзине апсорбоване дозе је ( $Gy h^{-1}$ ). Брзина апсорбоване дозе је величина од посебног значаја, када су у питању биолошки ефекти јонизујућег зрачења, пошто једнаке дозе одређене врсте зрачења, за различито вријеме трајања излагања изазивају различите биолошке ефекте. Рачунамо је на основу релације [Silari, 2012]:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

Еквивалентна доза ( $H_T$ ) је величина која у обзир, осим апсорбоване дозе, узима и врсту зрачења, а представља суму производа апсорбованих доза, по тикву или органу, и одговарајућих радијационих тежинских фактора. Јединица за изражавање еквивалентне дозе је сиверт ( $Sv$ ). Еквивалентна доза омогућава поређење и сумирање биолошких ефеката различитих врста зрачења или зрачења исте врсте различитих енергија. Рачунамо је на основу релације [IAEA, n.d.]:

$$H_T = \sum_{T,R} D_{T,R} W_R$$

Радијациони тежински фактори уствари описују како различите врсте и енергије зрачења утичу на настанак биолошких ефеката јонизујућег зрачења. Вриједности ових фактора се крећу од 1 (гама и бета зрачење), па до 20 (алфа честице и тешки јони). [IAEA, n.d.]

Еквивалентна доза је концепт који користимо приликом процјене ризика искључиво код животиња и људи, док код биљака приликом процјене ризика користимо апсорбовану дозу.

Иако се рад не бави директно процјеном ризика за људе, свакако је потребно направити повезницу између биљних и животињских врста за које се врши процјена и људи, пошто управо неке од тих врста улазе у састав ланца исхране људи, и на тај начин представљају потенцијални ризик и за људе. Треба поменути још једну дозиметријску величину, која представља концепт који се користи за процјену ризика од излагања јонизујућем зрачењу код људи, и то је ефективна доза.

Ефективна доза ( $H_E$ ) представља суму производа еквивалентних доза по органу и одговарајућих ткивних тежинских фактора за сваки озрачени орган. Јединица за изражавање ефективне дозе је сиверт (Sv). Рачунамо је на основу релације [IAEA, n.d.]:

$$H_E = \sum_T H_T W_T$$

Пошто једна те иста вриједност дозе, исте врсте зрачења, неће код различитих ткива и органа изазвати исти биолошки ефекат, уведен је појам ткивних тежинских фактора. Они служе за опис релативне осјетљивости ткива и органа на различите врсте зрачења. У табели Табела 2. су преиказане вриједности ткивних тежинских фактора за нека ткива и органе. [IAEA, n.d.]

Табела 2. Вриједности ткивних тежинских фактора за различита ткива и органе [S. Manabe et al., 2017.]

| Ткиво (орган)   | Ткивни тежински фактор |
|-----------------|------------------------|
| Гонаде          | 0.20                   |
| Коштана срж     | 0.12                   |
| Колон           | 0.12                   |
| Плућа           | 0.12                   |
| Желудац         | 0.12                   |
| Бешика          | 0.05                   |
| Груди           | 0.05                   |
| Јетра           | 0.05                   |
| Једњак          | 0.05                   |
| Штитна жлијезда | 0.05                   |
| Кожа            | 0.01                   |

### 3.2 LET u RBE

LET представља средњу енергију коју зрачење предаје материји по јединици дужине пута при проласку кроз материју. Изражава се у keV/μm или MeV/cm. Ову величину је могуће израчунати на основу релације:

$$LET = \frac{dE_L}{dl}$$

При чему је  $dE_L$  средња енергија предата материји а  $dl$  одговарајућа дужина пута. [Hall and Giaccia, 2002]

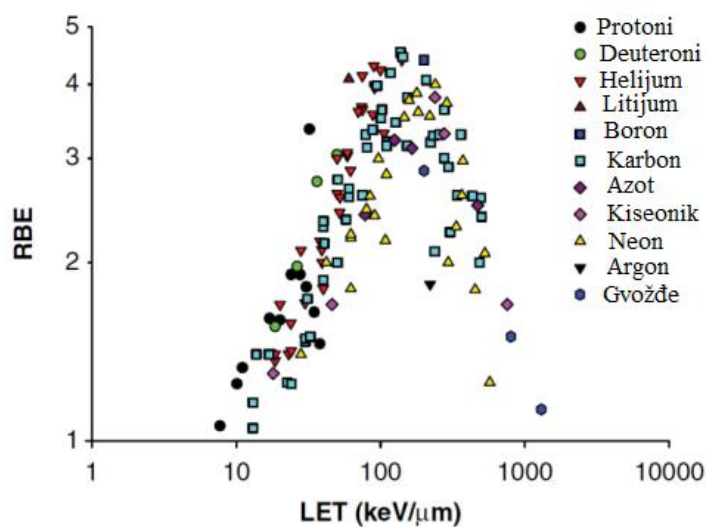
LET зависи од врсте и енергије наелектрисане честице и особина средине кроз коју честица пролази. Што је већи LET неке врсте зрачења, то је израженији биолошки ефекат који та врста зрачења изазива (што је већи број јонизација по јединичној дужини пута, то је биолошки ефекат израженији). Највеће вриједности LET имају алфа честице и тешки јони, док најмање вриједности LET одговарају x- зрацима, γ- зрацима и електронима.

Релативна биолошка ефикасност (*RBE*) одређене врсте зрачења је величина која показује колико се пута доза датог зрачења разликује од дозе референтног зрачења (најчешће је ријеч о гама зрацима који потичу од  $^{60}\text{Co}$ ), која изазива исти биолошки ефекат. Рачуна се на основу релације [Hall and Giaccia, 1998]:

$$RBE_x = \frac{D_R}{D_x}$$

При чему величина  $D_R$  представља дозу референтног зрачења а величина  $D_x$  дозу испитиваног зрачења. Ова величина зависи од врсте и енергије зрачења, разматраног биолошког ефекта, као и од радиоосјетљивости ткива или органа. RBE је концепт који се користи у радиобиологији, радиолошкој заштити и сродним областима. [Hall and Giaccia, 1998]

RBE расте са порастом LET, и то до вриједности LET од 100keV/μm, након чега RBE са порастом LET опада.



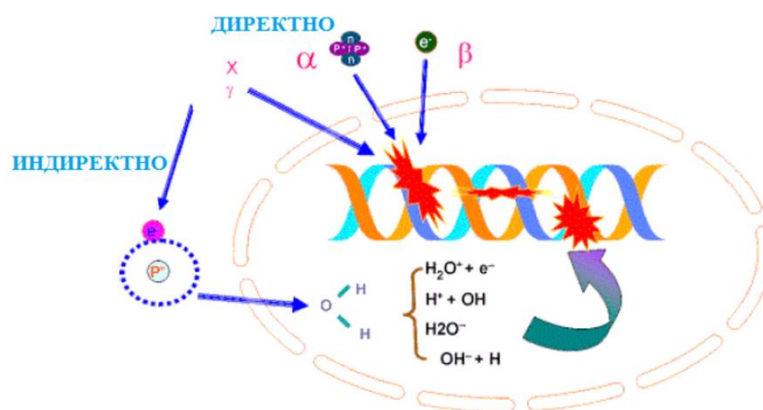
Слика 5. Веза RBE и LET [IAEA, n.d.]



### 3.3 Дејство јонизујућег зрачења на ДНК и ћелију

Механизми интеракције јонизујућег зрачења са материјом подразумевају двије врсте интеракција, то су:

- Директна интеракција
- Индиректна интеракција



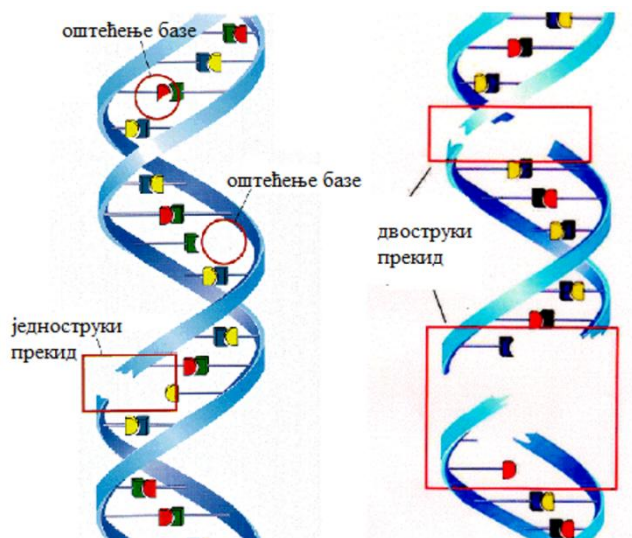
Слика 6. Механизми интеракције јонизујућег зрачења са материјом [Ahmad et al., 2022]

Директна интеракција представља интеракцију јонизујућег зрачења са органским молекулама, а за резултат има оштећење истих. Најважнији органски макромолекули у нашем организму су молекули рибонуклеинске киселине (РНК) и молекули дезоксирибонуклеинске киселине (ДНК), пошто ови молекули учествују у обнављању ћелија и преносу информација за синтезу истоврсних протеина у новим ћелијама. Оштећења РНК и ДНК могу да узрокују сметње у функцији ћелија, или чак и њихову смрт. Индиректна интеракција подразумева интеракцију јонизујућег зрачења са молекулом који је учествовао у директној интеракцији, или са производом тога молекула насталим у директној интеракцији. Примјер индиректне интеракције је и интеракција јонизујућег зрачења са водом, која има велики значај пошто су сви живи организми већински сачињени од воде (у зависности од врсте организма говоримо о различитим постотцима садржаја воде у организму). Као продукти ове интеракције, између осталог, настају водоник пероксид (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) и водоник диоксид (HO<sub>2</sub>), који изазивају оштећења ћелијских компоненти али и ћелијску смрт. [Henriksen and Maillie, 2002]

Молекули ДНК су сачињени од два дугачка, спирална ланца, које чине молекули дезоксирибозе повезани фосфорним везама. Ланци су међусобно повезани пуринским (аденин и гуанин) и пиримидинским (тимин и цитозин) базама. Оштећења која јонизујуће зрачење може изазвати код ДНК су:

- Оштећење базе (доводи до оштећења генетског кода и мутација)
- Прекид једног ланца (настају када је ДНК изложен зрачењу са малим LET, а ДНК се релативно лако опоравља)
- Прекид оба ланца (настају када је ДНК изложен зрачењу са великим LET, а ДНК се тешко опоравља) [Henriksen and Maillie, 2002]

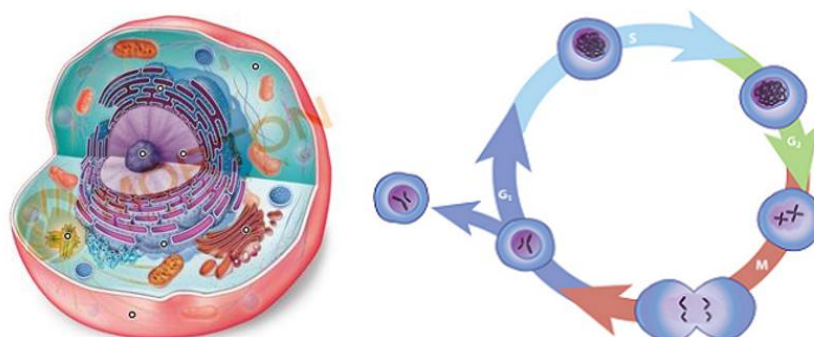
Доза од 1Gy узрокује отприлике  $10^5$  јонизација, које могу изазвати настанак преко хиљаду једноструких прекида ДНК ланаца и око четрдесет двоструких прекида, односно, можемо рећи да доза од 1Gy уништава 30% ћелијске линије.



Слика 7. Оштећења ДНК изазвана дејством јонизујућег зрачења [EPFL Doctoral Course PY-031, 2006.]

Саставни дијелови ћелије су једро, цитоплазма и мембрана. Између 70% и 85% ћелије чини вода, између 10% и 20% протеини, од 2% до 3% масти, око 1% нуклеинске киселине, око 1% угљени хидрати и око 1% осталих молекула. У току свог живота ћелија пролази кроз више фаза, што је приказано на слици Слика 8. (десно). Фазе  $G_1$  и  $G_2$  представљају интерфазу,  $S$ -фаза је фаза у којој долази до дупликације ДНК материјала, док  $M$ -фаза представља митозу и то је фаза у којој долази до диобе ћелије. Митоза подразумијева четири фазе, и то су : профаза, метафаза, анафаза и телофаза. [Henriksen and Maillie, 2002]

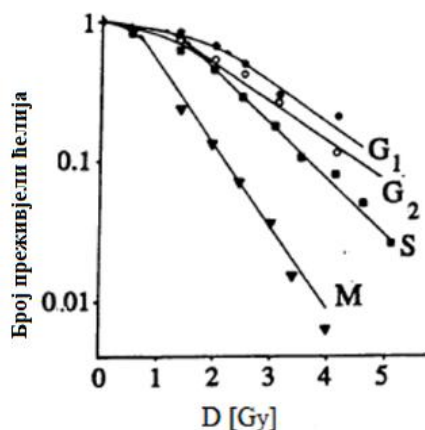
Експериментално је показано да је једро ћелије много осјетљивије на дејство јонизујућег зрачења од цитоплазме. Приликом излагања ћелије дози од 5mGy долази до успоравања процеса митозе, што за последицу има смањење броја новонасталих ћелија. [Henriksen and Maillie, 2002]



Слика 8. Ћелијска структура (лијево) и фазе ћелијског циклуса (десно) [Rezgui and Rachid, 2013]

Зависност биолошких ефеката, које јонизујуће зрачење изазива код ћелија, од дозе је могуће представити *кривим преживљавања*. Појам преживљавање се односи на способност репродукције ћелија. Криве преживљавања приказују број преживјелих

ћелија при излагању одређеним дозама. На слици *Слика 9.* су приказане криве ћелијског преживљавања у различитим фазама ћелијског циклуса, а поређењем ових кривих је могуће закључити да су ћелије најосјетљивије у току митозе, односно, у току *М*-фазе. [Henriksen and Maillie, 2002]



Слика 9. Крива ћелијског преживљавања [Henriksen and Maillie, 2002]

### 3.4 Класификација биолошких ефеката јонизујућег зрачења

Биолошки ефекти јонизујућег зрачења зависе од дозе али и од трајања излагања, а у зависности од поменутих параметара, као и од врсте организма, могу се јавити од пар сати, па до пар деценија након излагања јонизујућем зрачењу. Биолошке ефекте јонизујућег зрачења класификујемо на следећи начин:

- Детерминистички ефекти, подразумевају ефекте код којих постоји одређени праг дозе, односно, нека гранична вриједност дозе при којој настаје биолошки ефекат, и у случају да је вриједност дозе мања од граничне вриједности, неће доћи до настанка ефекта, а што је доза већа у односу на граничну вриједност то ће биолошки ефекат који она изазива бити израженији (овакви ефекти су, на примјер: оштећења мембрана, ензима и органела, као и спрјечавање или успоравање раста, код биљака, ћелијска смрт, оштећења органа и система органа која узрокују акутни радијациони синдром, па чак и смрт, код животиња, док код људи говоримо о кожним промјенама, алопецији, катаракти, стерилитету и др.)
- Стохастички ефекти, подразумевају ефекте код којих не постоји праг дозе, већ свака, па и најмања вриједност дозе представља потенцијални ризик (овакви ефекти су, на примјер: мутације гена које узрокују аберације раста и промјене у морфологији, као и оштећења ДНК која узрокују геномску нестабилност, код биљака, док код људи и животиња говоримо о сличним ефектима, као што су малигни тумори, генетска оштећења и др.)

Постоји још једна класификација биолошких ефеката, и то у зависности од врсте ћелија на којима настају оштећења, па говоримо о:

- Соматским ефектима (Соматске ћелије су све ћелије у организму, осим ћелија репродуктивног система. Ови ефекти могу бити рани и касни, а подразумевају различита оштећења ткива и органа, као и настанак мутација које се не преносе репродукцијом, већ се губе са смрћу ћелије.)
- Генетским ефектима (Ови ефекти подразумевају оштећења полних ћелија, која за последицу имају настанак мутација гена и хромозома. Главна разлика међу соматским и генетским оштећењима, је та што су генетска наслеђена.)

### **3.5 Биолошки ефекти јонизујућег зрачења на екосистеме**

Стабилност популације врсте је фактор који је од кључног значаја када је у питању опстанак одређене врсте. Јединке умиру, али се рађају нове, тако да ово стално рађање и смрт за резултат имају стабилну популацију, која се не мијења значајно током времена. Међутим, популацију врсте не можемо посматрати одвојено, већ опстанак врсте зависи и од интеракција са популацијама других врста. Нарушавање интегритета екосистема не представља опасност само за популацију врсте, већ за цијели екосистем. Можемо говорити о двије врсте промјена екосистема:

- Промјене првог типа, које су реверзибилне и у вези су са промјенама у динамици наслеђивања, а за последицу имају дјелимично нарушавање екосистема
- Промјене другог типа, које су иреверзибилне и за последицу имају потпуно нарушење наслеђених процеса у екосистему

Излагање биљака и животиња јонизујућем зрачењу може да изазове низ биолошких ефеката и то на различитим нивоима. Можемо говорити о следећим нивоима: молекуларни и ћелијски ниво, ниво организма, ниво популације и ниво екосистема. Ниво екосистема захтијева разматрање различитих ефеката који се јављају као последица у промјенама структуре и функционисања екосистема. Ове промјене подразумевају двије врсте промјена, и то: промјене изазване директно јонизујућим зрачењем (оне се односе на биолошке ефекте које јонизујуће зрачење изазива на живим организмима и њиховом станишту) и индиректне или секундарне промјене (оне настају када на једној или више компоненти посматраног екосистема постоји неко оштећење, што нарушава структуру цијелог екосистема). Проучавање биолошких ефеката јонизујућег зрачења је од кључног значаја у областима у којима: се складишти и/или закопава радијациони отпад, постоје нуклеарна постројења, се догодила нека врста нуклеарне експлозије или постоји висок ниво природног позадинског зрачења.

Када је ријеч о екосистемима, биолошке ефекте јонизујућег зрачења можемо класификовати на следећи начин:

- Оштећења ткива и ћелија (оштећења ДНК, протеина и других дијелова ћелије, поремећаји ћелијског метаболизма и репликације, ћелијска смрт и ткивна некроза)
- Генетске мутације (мутације, генетска оштећења која се преносе кроз генерације, хромозомске аберације)
- Репродуктивне дисфункције (смањена плодност, стерилитет)

- Нарушење процеса у екосистемима (нарушавање фотосинтезе, кружења материје и енергије, промјене у структури и динамици биљних и животињских врста)
- Биоаккумуляција и биомагнификација (упијање радиоактивних материја путем ланаца исхране, акумулација контаминирајућих материја у ланцима исхране)
- Промјене околине (контаминација земљишта, воде и ваздуха радиоактивним материјама, која може бити дуготрајна и за резултат може да има немогућност опоравка екосистема)

## 4. ERICA програм

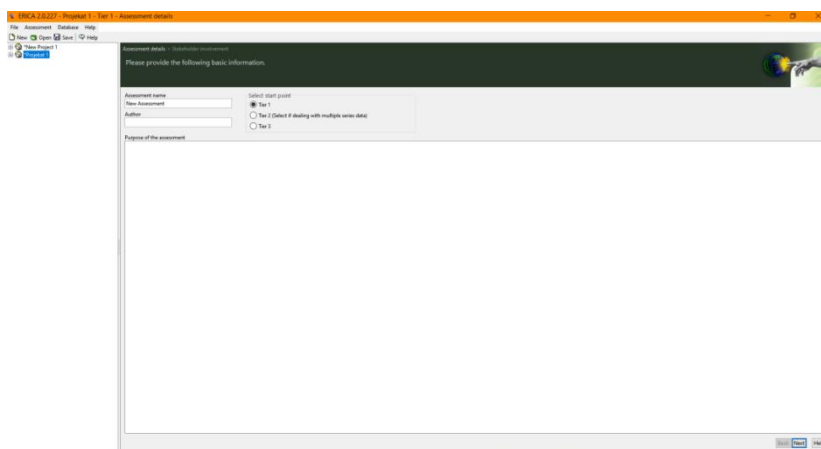
Програм *ERICA* (*Environmental Risk from Ionizing Contaminants: Assessment and Management*) представља софтверски систем, чија се структура базира на истоименом интегрисаном приступу процјене радиобиолошког ризика за биодиверзитет. Програм се користи приликом навођења корисника кроз процес процјене, као и за документовање информација и донесених одлука, при чему су омогућени прорачуни чији су резултати неопходни за процјену ризика у испитиваним екосистемима, и то за одређене биљне и животињске врсте. [Howard and Larsson, 2008]

У оквиру софтвера постоји и детаљан приручник (*Help Tool*), а сам софтвер је развијен помоћу програмског језика *JAVA*, док је програм дизајниран за рад у *JAVA* 6 окружењу (подржава и новије верзије). [Brown et al., 2008]

*ERICA* интегрисани приступ процјене и одговарајући софтвер су дио пројекта, а основни елементи *ERICA* интегрисаног приступа су: процјена, карактеризација и управљање. Појам процјена се односи на процес процјене експозиције биодиверзитета а укључује: процјену или мјерење концентрације активности у испитivanoј средини, али и у самим организмима, дефинисање услова под којима долази до излагања, као и процјену брзине дозе. Почетни корак у процесу процјене је избор одговарајућег ранга (Tier:  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ). Карактеризација ризика је процес који подразумева процјену вјероватноће за настанак штетних ефеката и штете коју ти ефекти узрокују. Што се управљања тиче, оно подразумева низ процеса који се одвијају прије, у току и након процјене. [Larsson, 2008]

### 4.1 Процјена

Након што смо унијели назив пројекта и исти потврдили, отвара се прозор који нам омогућава да унесемо назив процјене, име аутора, као и избор почетне тачке. Избор почетне тачке подразумева три ранга ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ), а ранг бирамо у зависности од тога колико детаљна процјена нам је потребна, али и какав је резултат дала употреба претходних рангова. Ако је коефицијент ризика већи од јединице морамо прећи на следећи ранг.



Слика 10. Компоненте прозора за опис процјене

Први ранг (*Tier 1*) користимо за једноставније процјене, а од корисника захтијева одабир радионуклида чије присуство испитујемо, врсте екосистема (водени, морски,

копнени), начин уноса концентрације средине (вода, седименти, земља, ваздух) и утицај просторних/временских података на цијелу процјену. Вриједности концентрација активности које корисник унесе се пореде са прописаним дозвољеним вриједностима, које су израчунате за велики број референтних организама и то за сваки радионуклид.

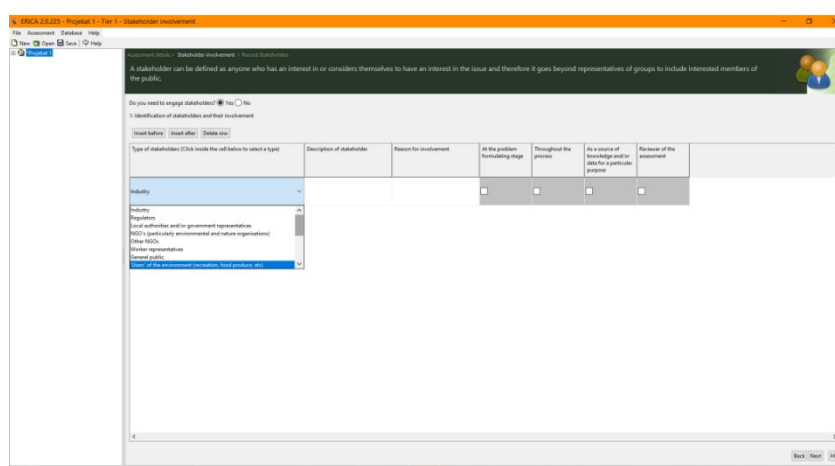
Други ранг (*Tier 2*) користимо када желимо детаљнију процјену, а осим свега што за унос захтијева први ранг, други ранг омогућава кориснику да мијења односе концентрација активности, дистрибуционих коефицијената (за водене средине) и одређених вриједности добијених из података карактеристичних за дату област испитивања.

Трећи ранг (*Tier 3*) користимо за комплексне процјене. Овакве процјене су засноване на вјероватноћи, што подразумеива одређивање мјерних несигурности. Овај ранг омогућава кориснику да процијени вјероватноћу за настанак и јачину радиобиолошког ефекта за одабране врсте.

У случају да је потребно, у оквиру овога прозора такође можемо описати и сврху процјене, што уствари значи да можемо описати потенцијални извор радиоактивних супстанци у средини, окарактерисати процјену као проспективну или ретроспективну, описати циљ процјене и улогу заштите.

## 4.2 Актери

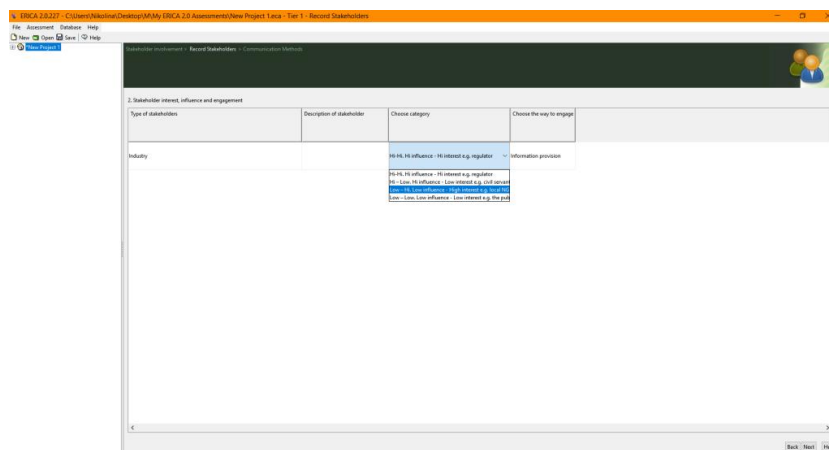
Појам актер се односи на било кога ко је на неки начин у вези са проблемом испитивања. У случају да сматрамо да додавање актера није потребно, потребно је да кликнемо на поље *NO*, при чему се отвара прозор, који нам омогућава да укратко оправдамо нашу одлуку. Додавање актера вршимо кликом на поље *YES*, након чега треба дати основне информације о актерима, што вршимо унутар четири прозора. У првом прозору, из падајућег менија, треба одабрати којој категорији припада наш актер, можемо додати назив и кратак опис актера, разлог укључења актера у процјену и на самом крају, одабиром одговарајућег квадратића, треба означити у ком периоду је актер укључен у процес процјене.



Слика 11. Одабир и опис актера

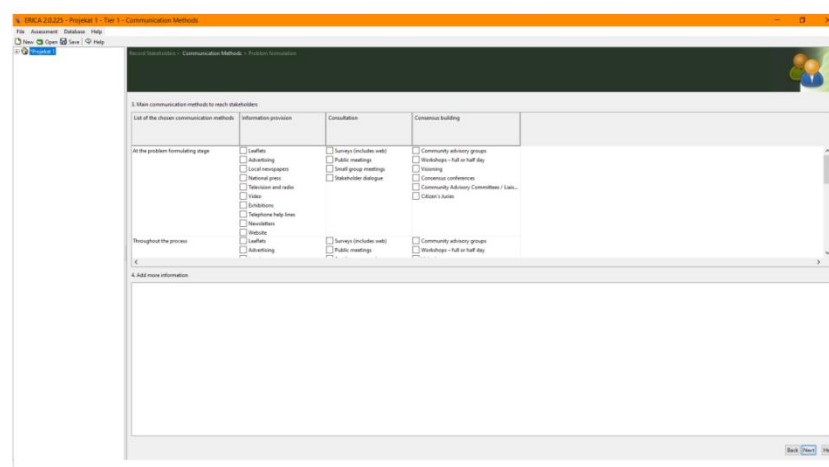
Следећи прозор служи за одабир категорије актера и начина на који је он укључен у процјену. Категорија представља ниво утицаја и интереса актера у процјени, а бирамо је из падајућег менија. Ако су утицај и интерес актера слаби (обично карактеристично за јавност), комуникација са актером је отежана и треба размотрити да ли он заиста

мора бити укључен у процес, док актере са високим утицајем и високим интересом (обично су то регулатори и девелопери) аутоматски укључујемо у процес процјене. Начин укључења актера у процес бирамо из последње, четврте колоне, такође из падајућег менија а понуђене опције су: обезбјеђивање информација, консултације и склапање договора.



Слика 12. Интерес, утицај и укључење актера

Трећи прозор омогућава одабир начина комуникације са актерима и то на основу периода у ком је актер укључен, или је био укључен, у процес процјене.



Слика 13. Одабир начина комуникације са актером

Четврти прозор нам омогућава додавање биљешки, као што су рецимо оправдања зашто су неки актери укључени у процес а други не, потенцијалне измјене почетних услова и слично.

### 4.3 Формулација проблема

Представља теоретску евалуацију ситуације која се процјењује, и као таква се користи да осигурамо да су сви релевантни референтни организми или организми које дефинише корисник укључени у процјену. Овај модел служи за оправдање и подршку одлука особе која врши процјену, али и за објашњење начина на који је проблем у датој процјени дефинисан. Прозор за формулацију проблема омогућава да детаљно опишемо

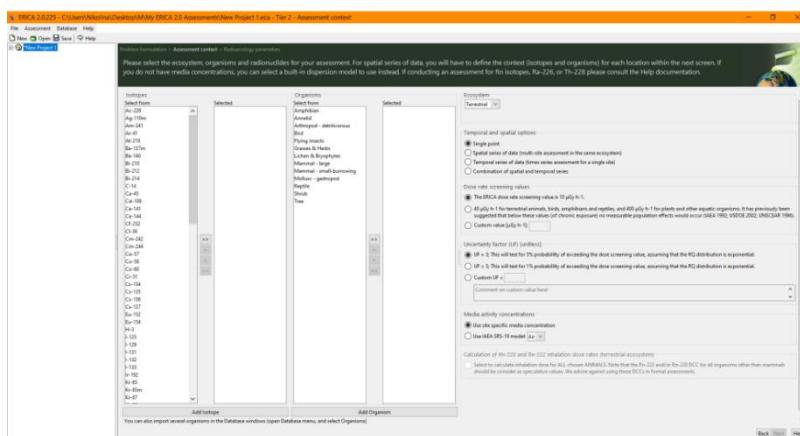


процјену, наведемо путеве транспорта и крајње тачке процјене, али и да, ако је то потребно, додамо илустрацију концептуалног модела (формулације проблема). Детаљан опис процјене подразумијева информације као што су: активност испитиване области, врсте радионуклида, начин отпуштања радионуклида у средину, присуство загађивача који нису радиоактивни, опис екосистема и његове динамике, присуство врста некарактеристичних за ту област, и сл. Дефинисање путева транспорта и крајњих тачака подразумијева да објаснимо: понашање радионуклида који су испуштени у средину, што уствари подразумијева да опишемо како ће се радионуклиди највјероватније распршити у средини и гдје ће њихова концентрација бити највећа, да ли су концентрације активности које користимо засноване на мјерењу, транспортним моделима или на просторно/временски усредњеним сетовима података, начин заштите одређених врста (обично су то ријетке или угрожене врсте), начин заштите популација и одржавање биодиверзитета у испитиваној области. Крајње тачке процјене су обично дефинисане законски или договором са актерима, а оно што је важно јесте да особа која врши процјену опише како избор ранга ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) утиче на крајње тачке. У случају да користимо први ранг, морамо имати на уму да су крајње тачке готово у потпуности предефинисане, и да су у неким уобичајеним условима одређене на тај начин да уствари одговарају референтним организмима. Када је у питању други ранг, у случају да дефинишемо геометрију засновану на одређеним врстама од интереса, треба да обезбиједимо информације о односу концентрација активности за сваки радионуклид који обухвата процјена за нову геометрију, као и факторе заузећа, можда ће бити потребно и описати како ће референтни организми које користимо током процјене представљати врсте од посебног значаја у процјени а оно што би такође било пожељно, јесте обезбиједити оправдање нашег избора. Финални корак у анализи захтијева везу између крајњих тачака процјене дефинисаних од стране корисника и алатке, што омогућава идентификацију и биљежење несигурности у оквиру другог ранга, у квалитативном смислу. Особа која врши процјену треба да крајње тачке дефинисане законски (*EU habitats Directive*) преведе у крајње тачке дефинисане од стране корисника. Ово подразумијева да треба објаснити како можемо искористити референтне организме да бисмо показали начин на који је могуће заштитити одређену врсту. Унутар другог ранга алатка користи уобичајене поставке и параметере, међутим употреба трећег ранга омогућава да мијењамо ове параметере, односно, омогућава да користимо појединачне тачке података карактеристичне за испитивану област, као и расподјеле података. Ако користимо трећи ранг важно је да у току формулације проблема, прије спровођења процјене, разматрамо шта би могла бити наша крајња тачка (MB - morbidity, MT - mortality, RC - reproductive capacity, MUT - mutation).

#### **4.4 Одабир екосистема, радионуклида и референтних организама**

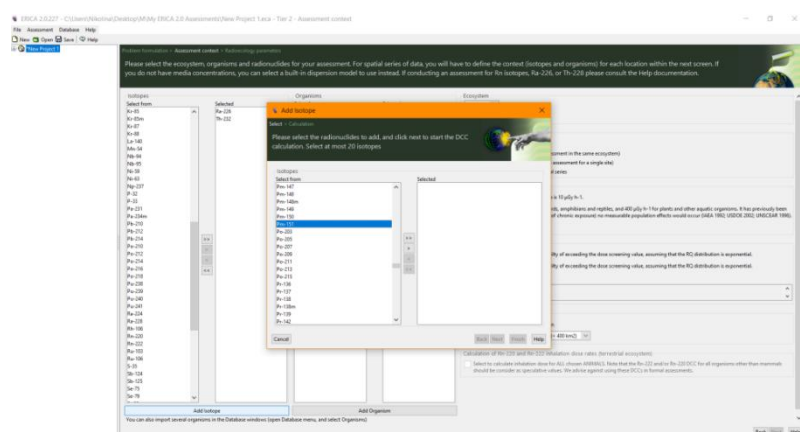
Овај прозор омогућава кориснику одабир врсте екосистема, а понуђене опције су: копнени, слатководни и морски. У склопу ова три екосистема је наведено десет различитих животних станишта (изнад површине тла, испод површине тла, испод површине воде, на површини воде). Приликом одабира екосистема у обзир треба узети карактеристике локације која садржи биљне и животињске врсте за које се врши процјена, и то су: географски положај, врста станишта, клима, и сл. Када је у питању избор радионуклида, алатка нуди избор од седамдесет радионуклида, при чему можемо изабрати само један или више њих истовремено, и то за сва три ранга. Појам *референтни организми* се односи геометријска тијела, која репрезентују организме за које се врши процјена. *ERICA* алатка садржи базу података која обухвата низ

референтних организама карактеристичних за претходно поменуте екосистеме. Први ранг не омогућава избор референтних организама, док преостала два ранга то омогућавају.

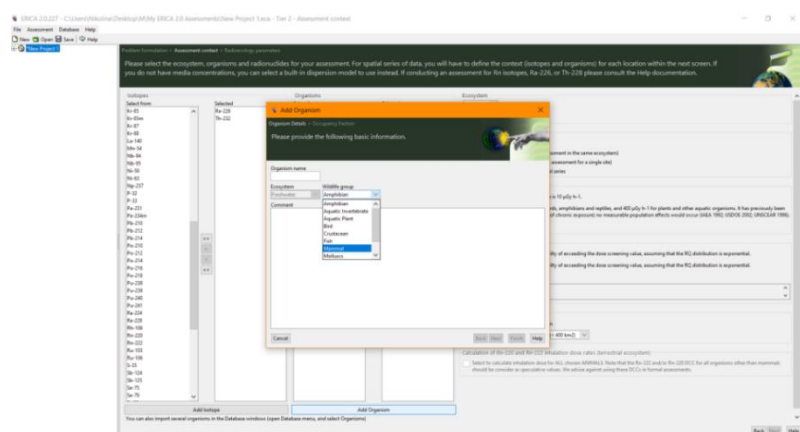


Слика 14. Избор екосистема, радионуклида и референтних организама

У случају да је потребно, корисницима је омогућено додавање радионуклида и организама који нису иницијално били доступни у програмском менију.



Слика 15. Додавање радионуклида



Слика 16. Додавање референтних организама

Табела 3. Избор радионуклида обухваћених ERICA алатком [Brown et al., 2008]

| Елемент             | Изотоп                               | Елемент           | Изотоп                                               |
|---------------------|--------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------|
| Ag, сребро          | Ag-110m                              | Po,<br>полонијум  | Po-210                                               |
| Am, америцијум      | Am-241                               | Pu,<br>плутонијум | Pu-238, Pu-239,<br>Pu-240, Pu-241                    |
| Ba, баријум         | Ba-140                               | Ra, радијум       | Ra-226, Ra-228                                       |
| C, угљеник          | C-14                                 | Ru,<br>рутенијум  | Ru-103, Ru-106                                       |
| Ca, калцијум        | Ca-45                                | S, сумпор         | S-35                                                 |
| Cd, кадмијум        | Cd-109                               | Sb,<br>антимон    | Sb-124, Sb-125                                       |
| Ce, церијум         | Ce-141, Ce-144                       | Se, селен         | Se-75, Se-79                                         |
| Cf,<br>калифорнијум | Cf-252                               | Sr,<br>стронцијум | Sr-89, Sr-90                                         |
| Cl, хлор            | Cl-36                                | Tc,<br>техницијум | Tc-99                                                |
| Cm, киријум         | Cm-242, Cm-243,<br>Cm-244            | Te, телур         | Te-129m, Te-132                                      |
| Co, кобалт          | Co-57, Co-58, Co-60                  | Th, торијум       | Th-227, Th-228,<br>Th-230, Th-231,<br>Th-232, Th-234 |
| Cr, хром            | Cr-51                                | U, уран           | U-234, U-235, U-238                                  |
| Cs, цезијум         | Cs-134, Cs-135,<br>Cs-136, Cs-137    | Zn, цинк          | Zn-65                                                |
| Eu, еуропијум       | Eu-152, Eu-154                       | Zr,<br>цирконијум | Zr-95                                                |
| H                   | H-3                                  |                   |                                                      |
| I, јод              | I-125, I-129, I-131,<br>I-132, I-133 |                   |                                                      |
| Ir, иридијум        | Ir-192                               |                   |                                                      |
| La, лантан          | La-140                               |                   |                                                      |
| Mn, манган          | Mn-54                                |                   |                                                      |
| Nb, ниобијум        | Nb-94, Nb-95                         |                   |                                                      |
| Ni, никл            | Ni-59, Ni-63                         |                   |                                                      |
| Np, непунијум       | Np-237                               |                   |                                                      |
| P, фосфор           | P-32, P-33                           |                   |                                                      |
| Ra,<br>проактинијум | Ra-231                               |                   |                                                      |
| Pb, олово           | Pb-210                               |                   |                                                      |

Радиоактивни потомци радионуклида наведених у табели се узимају у обзир код дозних конверзионих фактора ако им је вријеме полураспада краће од десет дана.

Табела 4. Избор референтних организама у зависности од избраног екосистема [Brown et al., 2008]

| Водени екосистеми   | Морски екосистеми       | Копнени екосистеми         |
|---------------------|-------------------------|----------------------------|
| водоземци           | бентонски организми     | водоземци                  |
| бентонски организми | птице                   | чланковити/прстенасти црви |
| птице               | ракови                  | сапрофаги                  |
| ларве инсеката      | морске траве            | летећи инсекти             |
| сисари              | сисари                  | птице                      |
| рептили             | шкољке                  | траве и биљке              |
| фитопланктон        | пелагичне рибе          | лишајеви и маховине        |
| зоопланктон         | фитопланктон            | крупни сисари              |
| пелагичне рибе      | чланковити црви         | синтни сисари              |
| ракови              | рептили                 | пужеви                     |
| шкољке              | морске анемоне и корали | рептили                    |
| пужеви              | васкуларне биљке        | жбуње                      |
| васкуларне биљке    | зоопланктон             | дрвеће                     |

У оквиру првог и другог ранга можемо изабрати различите вриједности брзине дозе скрининга и то су:

- вриједност брзине дозе од 10  $\mu\text{Gy/h}$ , за све екосистеме
- вриједност од 40  $\mu\text{Gy/h}$  за копнене животиње и 400  $\mu\text{Gy/h}$  за копнене биљке, за водене врсте се користи вриједност од 40  $\mu\text{Gy/h}$  и то за сисаре, рептиле, водоземце и птице, док се за остале врсте користи вриједност од 400  $\mu\text{Gy/h}$  [IAEA, 1993; UNSCEAR 1996]
- вриједност коју дефинише корисник, при чему алатка на основу вриједности коју ми задамо скалира резултате коефицијената ризика из калкулација насталих употребом ограничења за концентрације насталих на основу уобичајене брзине дозе коју поставља алатка, тј. 10  $\mu\text{Gy/h}$  (ако је вриједност брзине дозе коју ми дефинишемо 20  $\mu\text{Gy/h}$ , онда алатка једноставно дијели коефицијенте ризика са два) [Brown et al., 2008]

#### 4.5 Параметри преноса у ERICA програму

Параметри преноса представљају квантитативне податке који служе за опис кретања и расподјеле радионуклида у екосистемима. Неки од параметара преноса које подразумева ERICA алатка су:

- Биоаккумуляциони фактор (*BCF*), који описује концентрацију активности радионуклида у референтном организму у односу на концентрацију активности радионуклида у околини у којој се налази организам (вода, земљиште, седимент)
- Однос концентрација (*CR*), који представља однос концентрације активности радионуклида у референтном организму и концентрације активности радионуклида у средини у којој се организам налази
- Фактор преноса (*TF*), који описује пренос радионуклида из једног дијела екосистема у други (нпр. из воде у биљку)
- Брзина уноса и избацивања радионуклида у, односно, из организма

- Коефицијент расподјеле ( $K_d$ ), који описује расподјелу радионуклида између узорка у чврстом и течном стању

Транспорт радионуклида је сложен процес на који утичу различити фактори као што су: физичко-хемијска својства радионуклида, физичка и хемијска природа средине која апсорбује дати радионуклид, хомеостатска контрола (способност живог организма да одржава стабилност сопственог биолошког система, без обзира на промјене у околини), расподјела радионуклида у организму и други параметри. Овакав процес захтијева развој практичних модела који се користе за процјену излагања. *ERICA* програм је захтијевао одређена поједностављења у смислу ограничења броја екосистема и референтних организама, али је чак и уз ова поједностављења програм захтијевао матрицу од чак хиљаду стотину седамдесет осам комбинација вриједности фактора преноса радионуклид-организам да би параметризација *ERICA* програма била могућа (параметризација подразумијева дефинисање и унос одговарајућих вриједности фактора преноса у базу програма). Да би процјена уопште била могућа првенствено је било потребно попунити "празнине", односно, доћи до вриједности података који недостају. [Brown, Beresford and Hosseini, 2012]

Подаци за одабране екосистеме, радионуклиде и организме су прикупљени из, до тада, доступне литературе, а они су уствари представљали директна мјерења вршена у организмима и околини, и то у теренским условима. До 2008. године су били доступни подаци за извођење фактора преноса за мање од 40% потребних комбинација радионуклид - организм, док су преостали подаци добијени на различите начине, екстраполацијом. Међународна комисија за радиолошку заштиту (ICRP), се упркос томе што су ови подаци постали дио базе података програма, за добијање најпрецизнијих процјена фактора преноса за одређене радионуклиде и организме и даље морала ослањати на екстраполацију. Методологија екстраполације *ERICA* програма је ICRP-и омогућила процјену вриједности фактора преноса за оне комбинације радионуклид - организм за које нису постојали емпиријски подаци, односно, ICRP је искористила и прилагодила постојећу методологију екстраполације *ERICA* програма, на тај начин да ова методологија представља базу методологије екстраполације и процјене вриједности фактора преноса радионуклида, онда када емпиријски подаци нису доступни. [Brown, Beresford and Hosseini, 2012]

#### 4.6 Одређивање односа концентрација

Концентрације активности радионуклида у биодиверзитету, помоћу *ERICA* програма, можемо добити на основу концентрације активности у испитиваној средини и равнотежних односа концентрација ( $CR_s$ ). У зависности од врсте екосистема и радионуклида односе концентрација одређујемо помоћу три једначине.

У случају копнених екосистема користимо следећу једначину [Beresford et al., 2008]:

$$CR = \frac{\text{Activity concentration in biota whole body (Bqkg}^{-1} \text{ fresh weight)}}{\text{Activity concentration in soil (Bqkg}^{-1} \text{ dry weight)}}$$

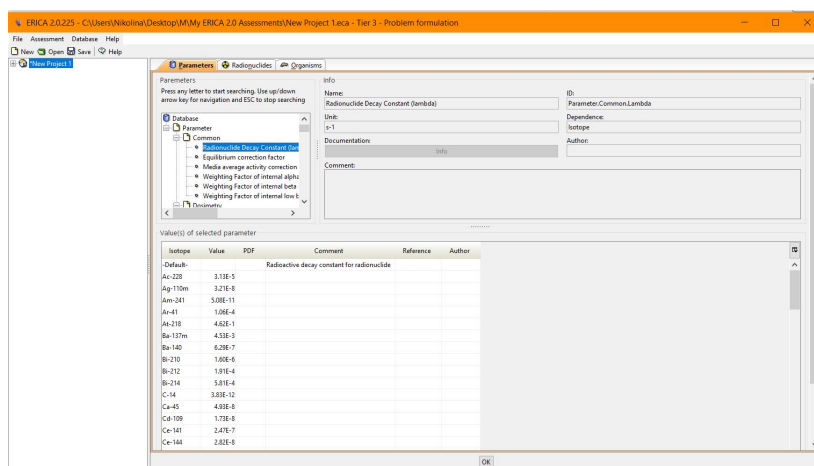
У случају хроничног испуштања  $^3H$ ,  $^{14}C$ ,  $^{32}P$  и  $^{35}S$  у атмосферу, користимо следећу једначину [Beresford et al., 2008]:

$$CR = \frac{\text{Activity concentration in biota whole body (Bqkg}^{-1} \text{ fresh weight)}}{\text{Activity concentration in air (Bqm}^{-3}\text{)}}$$

У случају слатководних и морских екосистема користимо следећу једначину [Brown et al., 2008]:

$$CR = \frac{\text{Activity concentration in biota whole body (Bqkg}^{-1} \text{ fresh weight)}}{\text{Activity concentration of filtered water (Bql}^{-1}\text{)}}$$

Дакле, прву и другу једначину користимо у случају копнених екосистема, док трећу једначину користимо у случају слатководних и морских екосистема. Вриједности односа концентрација се чувају у бази података алатке (тзв. *Радиоколошка база*), чија је улога обезбјеђивање вриједности за сваки изотоп и референтни организам. [Brown et al., 2008]



Слика 17. Радиоколошка база ERICA алатке

У оквиру другог и трећег ранга, алатка омогућава процјену концентрације активности у средини, и то дијелењем концентрације активности у биодиверзитету одговарајућим односом концентрација. Код водених и морских екосистема користимо коефицијенте расподеле како бисмо добили концентрацију активности у седиментима на основу концентрације у води, и обрнуто. Коефицијенти расподеле представљају однос концентрације активности у седиментима по јединици масе и концентрације активности у води по јединици масе или јединици запремине. Радиолошка база такође садржи и вриједности коефицијената расподеле, а њихове првобитне вриједности су засноване на *IAEA* извјештајима из 2001. године и 2004. године. [Brown et al., 2008]

Коефицијенте расподеле  $K_{di}$  (бездимензиона величина или  $l\ kg^{-1}$ ) рачунамо на основу следеће једначине [Hosseini et al., 2008]:

$$K_{di} = \frac{C_i^{sed}}{C_i^{aq}}$$

Гдје величина  $C_i^{aq}$  представља концентрацију активности радионуклида  $i$  у седименту ( $Bq\ kg^{-1}$ ), док величина  $C_i^{sed}$  представља концентрацију активности радионуклида  $i$  сконцентрисаног, обично, у филтрираној води ( $Bq\ l^{-1}$  или  $Bq\ kg^{-1}$ ). [Hosseini et al., 2008] Одређивање вриједности односа концентрација подразумева да полазимо од претпоставке да је организам у радиоактивној равнотежи са околином у којој се налази (концентрација активности радионуклида у организму се изједначава са

концентрацијом активности радионуклида у средини у којој се организам налази). Вријеме потребно за настанак биогеохемијске (радиоактивне) равнотеже зависи од времена полураспада датог радионуклида и биолошког полувремена распада радионуклида у разматраном организму. Међутим, организми у стварности радионуклиде задржавају и испуштају у околину у временским интервалима који могу варирати од пар дана, па све до пар година, па претпоставка тренутне биогеохемијске равнотеже може да буде узрок погрешне процјене концентрација активности у организмима. Различити поремећаји у екосистемима могу да узрокују пренос радионуклида, односно контаминаната, у ланцу исхране, па однос концентрације активности радионуклида у води и концентрације активности радионуклида у организму, чија концентрација контаминаната потиче највећим дијелом од уноса хране, не мора бити линеаран. Управо због овога су развијене методе за одређивање концентрационих односа при условима неравнотеже. [Hosseini et al., 2008]

#### 4.7 Прорачун брзине дозе

Суштински корак приликом процјене помоћу *ERICA* програма јесте управо процјена брзине апсорбоване дозе ( $\mu\text{Gy h}^{-1}$ ), пошто ова величина омогућава тумачење концентрација активности појединих радионуклида у средини и биоти, у смислу потенцијалних ефеката. Присуство радионуклида у животној средини представља потенцијални ризик за биљне и животињске врсте, а разликујемо спољашње и унутрашње излагање. Унутрашње излагање настаје уносом радионуклида путем воде, хране или дисањем, код животиња, док код биљака до унутрашњег излагања долази тако што биљке преко корјена упијају материје из земљишта, између осталог и радионуклиде. Унутрашња изложеност зависи од концентрације активности радионуклида у организму, величине организма, врсте и енергије емитованог зрачења. Спољашња изложеност зависи од контаминације животне средине, станишта, величине организма, геометријског односа између извора зрачења и изложеног организма, и многих других фактора. Интензитет зрачног поља око извора опада са повећањем растојања мете од извора, а на њега утиче и средина која се налази између извора и мете. Број могућих конфигурација извор-мета је бесконачан, па је потребно размотрити ограничен и репрезентативни скуп ситуација. [Beresford et al., 2004]

Исте вриједности апсорбоване дозе двије различите врсте јонизујућих зрачења неће изазвати исти биолошки ефекат, па је уведен појам тежинског фактора ( $W_R$ ), који описује релативној биолошкој утицај различитих врста зрачења. Еквивалентна доза представља суму производа радијационих тежинских фактора и апсорбованих доза и изражава се у сивертима ( $Sv$ ). Ова величина служи за процјену биолошких ефеката различитих врста зрачења на организме, ограничавање излагања јонизујућем зрачењу и планирање радиотерапијских процедура. Међутим, еквивалентна доза дефинисана на овај начин није примјенљива када је у питању биота, пошто су, када је у питању биота, примарни детерминистички ефекти као што су: морталитет, морбидитет, смањење способности репродукције, и сл. Ово уствари значи да радијационе тежинске факторе, које користимо за процјену дозе када су у питању људи, није могуће директно примјенити при процјени дозе и ризика када је у питању биота. [Ulanovsky, Pröhl and Gómez-Ros, 2008]

Живи организми се итекако разликују, првенствено када су у питању величина, облик и природно станиште, па су креирани многобројни дозиметријски модели који подразумевају одређена поједностављења, као што су:

- Сматра се да је облик организама приближан сфери или елипсоиду
- Код унутрашњих излагања, органи се не разматрају експлицитно и претпоставља се да је расподјела радиоактивности у цијелом тијелу хомогена
- Претпоставља се равнотежа концентрације активности у цијелом организму
- Код спољашњих излагања се разматрају различите типичне ситуације, као што је, на примјер, спољашње излагање референтног организма који живи у или на контаминираном земљишту [Ulanovsky, Pröhl and Gómez-Ros, 2008]

Величине које обухватају претходно поменута поједностављења су такозвани конверзиони дозни коефицијенти (*Dose Conversion Coefficients, mj. DCC*). Ове величине представљају јако важан дио методологије *ERICA* програма. Омогућавају претварање концентрације активности радионуклида у екосистему (животној средини) у апсорбовану дозу у референтним организмима, што је од кључног значаја за процјену радиолошког ризика за организме али и екосистеме. Конверзиони дозни коефицијенти омогућавају конзистентност и упоредивост процјене дозе међу различитим ситуацијама и локацијама, али и научно заснован и стандардизован приступ процјени радиолошког ризика. [Larson, 2008]

Табела 5. *FASSET* геометрије кориштене приликом рачунања дозних конверзионих коефицијената [FASSET Coordination Network, 2003]

| Организам             | Приближан облик | Дужина, ширина и висина [cm] | Маса [g] | Заштитни слој [cm] |
|-----------------------|-----------------|------------------------------|----------|--------------------|
| Стонога               | Елипсоид        | 1.7, 0.6, 0.3                | 0.17     | 0                  |
| Кишна глиста          | Цилиндар        | 12, 0.8, 0.8                 | 6        | 0                  |
| Миш/птица (мала)      | Елипсоид        | 7, 3, 3                      | 35       | 0.1                |
| Кртица                | Елипсоид        | 11, 4, 4                     | 97       | 0.1                |
| Змија                 | Цилиндар        | 100, 3, 3                    | 740      | 0                  |
| Зећ/птица (велика)    | Елипсоид        | 30, 11, 11                   | 2000     | 0.1                |
| Лисица                | Елипсоид        | 40, 15, 20                   | 6600     | 0.1                |
| Јелен                 | Елипсоид        | 60, 27, 27                   | 24000    | 0.1                |
| Говедо                | Елипсоид        | 160, 70, 90                  | 550000   | 0.3                |
| Птичије јаје (мало)   | Елипсоид        | 2.4, 1.7, 1.7                | 4        | 0.1                |
| Птичије јаје (велико) | Елипсоид        | 4.5, 3, 3                    | 22       | 0.1                |

Након што су вриједности концентрација активности у средини и живим организмима познате можемо израчунати брзине апсорбоване унутрашње и спољашње дозе и то помоћу следећих једначина, гдје прва једначина има облик [Prlić et al., 2017]:

$$\dot{D}_{int}^b = \sum_i C_i^b DCC_{int,i}^b$$

Величина  $C_i^b$  представља просјечну концентрацију датог радионуклида  $i$  у референтном организму  $b$ . Величина  $DCC_{int,i}^b$  представља специфични дозни конверзиони коефицијент за дати радионуклид  $i$  и то при унутрашњој експозицији, а уствари га дефинишемо као однос између просјечне концентрације активности радионуклида  $i$  у организму и вриједности брзине дозе за дати организм  $b$ . [Prlić et al., 2017]



Док је друга једначина [Prlić et al., 2017]:

$$\dot{D}_{ext}^b = \sum_z v_z \sum_i C_{zi}^{ref} DCC_{ext,zi}^b$$

При чему  $v_z$  представља фактор заузетости, односно временски интервал током кога је организам  $b$  на одређеној позицији  $z$  у његовом станишту. Величина  $C_{zi}^{ref}$  представља просјечну концентрацију радионуклида  $i$  у референтној средини на позицији  $z$ . Величина  $DCC_{ext,zi}^b$  представља дозни конверзиони коефицијент за спољашњу експозицију а дефинише се као однос просјечне концентрације активности радионуклида  $i$  у референтној средини на позицији  $z$  и брзине дозе за дати организам  $b$ . [Prlić et al., 2017]

ERICA алатка служи за процјену укупне тежинске брзине дозе и то употребом тежинских фактора за алфа, нискоенергетско бета, високоенергетско бета и високоенергетско гама зрачење. Дозне конверзионе коефицијенте за унутрашњу и спољашњу експозицију одређујемо на основу следећих једначина [Prlić et al., 2017]:

$$DCC_{int} = w_{f_{low\beta}} DCC_{int, low\beta} + w_{f_{\beta+\gamma}} DCC_{int, \beta+\gamma} + w_{f_{\alpha}} DCC_{int, \alpha}$$

$$DCC_{ext} = w_{f_{low\beta}} DCC_{ext, low\beta} + w_{f_{\beta+\gamma}} DCC_{ext, \beta+\gamma}$$

Величине  $w_f$  представљају тежинске факторе за различите компоненте зрачења, а величине  $DCC$ , као што је већ поменуто, представљају дозне конверзионе коефицијенте и изражавамо их у  $\mu Gy h^{-1} / Bq l^{-1}$  или у  $\mu Gy h^{-1} / Bq kg^{-1}$ . [Prlić et al., 2017]

Унутар првог ранга ( $T_1$ ), вриједност тежинског фактора за алфа честице износи десет, за нискоенергетске бета честице три, а за високоенергетске бета и гама честице је овај фактор једнак јединици. Други ( $T_2$ ) и трећи ( $T_3$ ) ранг омогућавају да користимо произвољне вриједности тежинских фактора или да њихове вриједности подесимо као јединичне. [Prlić et al., 2017]

Процес процјене завршава онда када је укупна брзина апсорбоване дозе за референтни систем у датом екосистему израчуната.



Слика 18. Одређивање укупне брзине апсорбоване дозе [Brown, Beresford and Hosseini, 2012]

#### 4.8 Рангови ( $T_1$ , $T_2$ , $T_3$ )

*ERICA* алатка подразумева три ранга, а избор ранга један је од почетних корака приликом процјене. Први ранг ( $T_1$ ) користимо за једноставне и конзервативне процјене које од корисника захтијевају да унесе свега пар основних улазних података, који кориснику омогућавају да оконча процес и изузме дату ситуацију из даље евалуације, а све под условом да дата процјена задовољава критеријум за скрининг који је унапријед дефинисан. Подразумијевани критеријум за скрининг у *ERICA* интегрисаном приступу је инкрементална брзина дозе од  $10\mu\text{Gy/h}$ . Ова вриједност се користи за све екосистеме и за све организме, а изведена је из анализе расподеле осјетљивости врста на основу расподеле осјетљивости врста на основу података о хроничном излагању у *FREDERICA* бази података. Ова анализа је показала да не постоји основа за раздавајање морских, слатководних и копнених екосистема, када је у питању осјетљивост организама на зрачење. Унапријед дефинисана брзина дозе служи за добијање граничних вриједности концентрација у средини и то за све комбинације радионуклида и референтних организама. [Larsson, 2008]

*ERICA* алатка, у оквиру првог ранга, уствари упоређује улазне концентрације активности појединачних радионуклида у срединама са вриједностима *EMCL* (*Environmental Media Concentration Limit*) за сваки радионуклид и одређује коефицијент ризика ( $RQ$ ), који је дефинисан следећом једначином [Larsson, 2008]:

$$RQ = \frac{\text{assessed value}}{\text{screening value}}$$

Односно, као однос измјерене или процијењене вриједности концентрације активности датог радионуклида у испитиваној средини и предефинисане, тј. референтне вриједности концентрације активности. Ако је вриједност овога фактора мања од јединице, алатка предлаже кориснику да прекине процес процјене, у супротном, када је овај фактор већи од јединице, процјена се наставља. [Larsson, 2008]

Други ранг ( $T_2$ ) омогућава кориснику већу флексибилност у односу на први ранг, у смислу да корисник може да мијења специфичне параметре и референтне организме приликом процјене. Укупна процијењена тежинска апсорбована доза за сваки референтни организам у процјени се пореди са скрининг вриједностима брзине дозе, а ове вриједности бира особа која врши процјену. Фактор ризика за референтни организам рачунамо помоћу следеће једначине [Prlić et al., 2017]:

$$RQ_{\text{org}} = \frac{DR_{\text{org}}}{SDR}$$

Овај фактор представља однос процијењене брзине дозе за референтни организам  $DR_{\text{org}}$  и скрининг вриједности брзине дозе, коју бира особа која врши процјену  $SDR$ . Овај фактор је бездимензиона величина. [Prlić et al., 2017]

Основна разлика између првог и другог ранга јесте то да се фактор ризика код другог ранга добија на основу процијењених вриједности. Конзервативне вриједности добијамо ако у обзир узмемо тзв. *фактор несигурности*, који представља апроксимацију коју примјењујемо приликом процјене брзине дозе, а дефинисан је као однос између деведесет петог, деведесет деветог или било ког другог процента, који је изнад очекиване вриједности, и очекиване вриједности расподеле брзине дозе (али и  $RQ$ ). [Brown et al., 2008]

Трећи ранг ( $T_3$ ) представља пробабиллистичку процјену ризика (*Monte Carlo симулације*), која подразумемијева да несигурности резултата можемо одредити употребом анализе осјетљивости. Кориснику је доступна научна литература о биолошким ефектима јонизујућег зрачења, што кориснику омогућава да процијени вјероватноћу за настанак еколошких ефеката, али и њихову јачину, као и да у комуникацији са актерима одреди прихватљивост ризика за биљне и животињске врсте. Ситуације код којих треба користити трећи ранг су комплексне, а детаљно и специфично упуство за спровођење процјене у овом случају не постоји. Оно што је јако важно поменути, јесте да процјена унутар трећег ранга не даје једноставан одговор (да или не), нити инкрементална брзина дозе од 10  $\mu\text{Gy/h}$  одговара крајњој тачки процјене. [Larsson, 2008]

Анализа осјетљивости је сегмент процјене ризика унутар трећег ранга ( $T_3$ ) и служи за одређивање релативног доприноса несигурности које одговарају свим улазним вриједностима и вриједности параметара крајњој тачки процјене. У *ERICA* програму анализа осјетљивости се заснива на вези између улазних вриједности, односно, параметара и крајње тачке процјене, што подразумеива рачунање два коефицијента који описују ту везу, и то су: *the Pearson Corelation Coefficient (PCC)* и *the Spearman Rank Correlation Coefficient (SRCC)*. PCC подразумеива линеарну везу промјенљивих, док SRCC не подразумеива линеарну везу. Резултате анализе осјетљивости је могуће приказати помоћу такозваних *торнадо дијаграма* за сваки параметар. [Beresford et al., 2004]



Ови дијаграми представљају стубичасте дијаграме (*bar graph*), који приказују статистике осјетљивости (*CC*, *SRCC*) у опадајућем редослиједу апсолутних вриједности. Што је хоризонтални стуб дужи, то је израженији утицај параметра на крајњу тачку процјене. Параметри, чије су вриједности мјера осјетљивости позитивне, имају позитиван утицај на крајњу тачку, док они са негативним вриједностима имају негативан ефекат на крајњу тачку процјене. [Beresford et al., 2004]

#### **4.10 Биолошки ефекти и њихова веза са брзином дозе**

Веза између брзине дозе и биолошких ефеката јонизујућег зрачења је обрнуто пропорционална, у смислу да што је већа брзина дозе то су биолошки ефекти израженији. Управо ову везу *ERICA* програм користи приликом процјене ризика при излагању јонизујућем зрачењу, и то, како је већ поменуто, у различитим ранговима. Детаљније процјене подразумијевају да у обзир узимамо све већи број, обично, сложенијих фактора који итекако утичу на везу брзине дозе и биолошких ефеката.

Примарни извор информација за анализу биолошких ефеката у зависности од брзине дозе је *FREDERICA* база података. Ова база садржи информације из *FASSET* базе података о ефектима јонизујућег зрачења, а пошто она обухвата податке из периода од 1945. па до 2001. године, додати су и подаци из новијих извора. Осим поменутог, *FREDERICA* садржи и резултате експеримената обухваћених *ERICA* пројектом. Ови подаци су кориштени за : извођење максималне вриједности дозе, за коју се сматра да неће изазвати штетан ефекат (ова вриједност се користи као гранична вриједност скрининг брзине дозе), за дефинисање табела брзог прегледа у оквиру другог ранга, а све како би било омогућено добијање квалитативног описа ефеката до којих потенцијално може доћи у одређеном опсегу изложености (укључујући и информације о позадинском зрачењу), као и за одређена специфична претраживања, као што су, на примјер, она која се односе на заштиту угрожених врста или специфичних крајњих тачака. База података садржи око тридесет хиљада података, при чему ови подаци одговарају паровима тачака изложеност - ефекат. Осим самих података база садржи и информације о различитим условима који описују ситуације у којима су подаци добијени. [Beresford et al., 2004]

Што се тиче биолошких ефеката, подаци су већински производ ефеката уочених на индивидуалном нивоу, па и на суб-индивидуалном нивоу (генетски и молекуларни). Биолошки јонизујућег зрачења су сврстани у четири групе (*umbrella effect*), и то су:

- Морбидитет, што подразумијева: стопу раста, ефекте на имунолошки систем и ефекте повезане са оштећењем средњег нервног система
- Смртност, што подразумијева: стохастичке ефекте, у смислу мутација и настанка карцинома, и детерминистичке ефекте, у смислу ефеката који мијењају стопу смртности и очекивану дужину животног вијека
- Репродуктивни капацитет, што подразумијева: плодност и развој ембриона
- Мутације соматских и репродуктивних ћелија [Beresford et al., 2004]

Чак 73% података о ефектима зрачења, који чине *FREDERICA* базу, су везани за копнене екосистеме. За сваки екосистем постоји, отприлике, два пута више података о акутној него о хроничној изложености, и то обично за спољашње извора гама зрачења. Ова база података такође садржи и око четири стотине података из *EPIC* базе података (подаци добијени при руским, тј. бившим совјетским експерименталним и теренским

истраживањима везаним за ефекте хроничне брзине дозе на дивље врсте у различитим екосистемима, укључујући и Арктик). [Beresford et al., 2004]

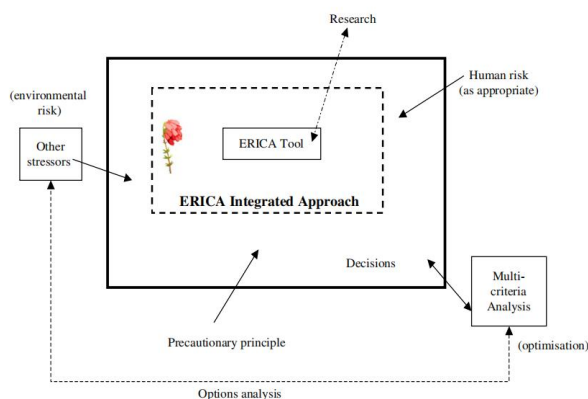
Унутар другог и трећег ранга, при процјени користимо предвиђену брзину дозе за референтни организам, коју је могуће поредити са брзинама доза за које већ унапријед можемо рећи да ће изазвати одређени биолошки ефекат. Код трећег ранга се процјена може усмјерити на специфичне или заштићене врсте, али и на појединачне ситуације које разматрају штетне ефекте, који утичу на репродукцију, раст или преживљавање. У случају да радимо са специфичним врстама, у случају да врста за коју вршимо процјену није доступна у бази података, из базе података треба одабрати врсту која најбоље одговара оној за коју се врши процјена.

#### 4.11 Разматрања након процјене

Свака процјена може имати три исхода (што се описује такозваним системом семафора: црвено, жуто и зелено), и то:

- да постоји занемарив разлог за забринутост, до чега долази онда када резултати процјене нису премашили вриједности конзервативних критеријума унутар првог и другог ранга, или ако постоји више разлога који би могли да омогуће изузимање испитиване ситуације из даље процјене
- да нисмо сигурни да је разлог за забринутост занемарив (потенцијално постоји опасност од излагања јонизујућем зрачењу), што се обично догађа унутар трећег ранга, који подразумева пробабилистичку процјену ризика, а овакве ситуације захтијевају детаљнију процјену или додатна, стриктнија разматрања
- да смо сигурни да постоји разлог за забринутост, и кориснику се онда препоручује да обави детаљну процјену унутар другог ранга или да пређе на трећи ранг (ако већ не користи исти)

Када је у питању прекид процјене, ако се ради о другом или трећем рангу, прекид је потребно оправдати, што је могуће урадити употребом информација из *FREDERICA* базе. [Larsson, 2008]



Слика 20. Начин на који ERICA алатка и интегрисани приступ учествују у процесу доношења одлуке [Yinger and Oughton, 2007]

*ERICA* интегрисани приступ не прописује специфичне кораке приликом употребе другог и трећег ранга, већ кориснику пружа систематски приступ за разматрање исхода процјене, а такође пружа флексибилност приликом доношења одлука након процјене (ова флексибилност потиче од различитих законодавних прописа у околини). Корисници заједно са актерима, ако су актери укључени у овом дијелу процеса, треба да размотре резултате, доступне информације, релевантне прописе и смјернице, и на крају заједно одреде начин на који ће даље дјеловати. На слици, *Слика 20.*, је приказана шема процеса доношења одлуке и начина на који *ERICA* алатка и интегрисани приступ учествују у овом процесу. [Larsson, 2008]

## 5. Припрема узорака, методе и резултати мјерења

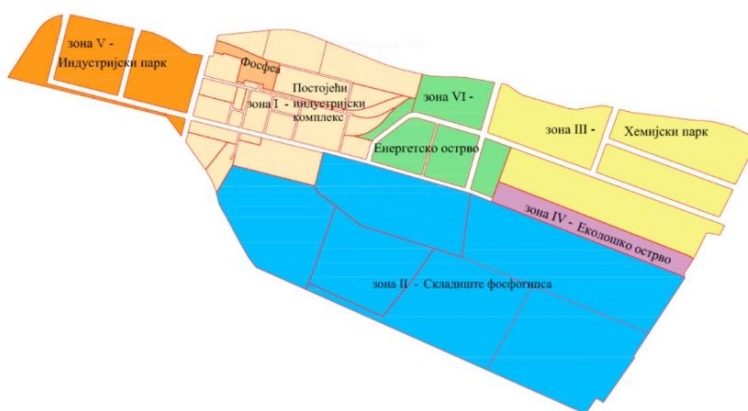
### 5.1 Припрема узорака

За анализу су кориштени узорци фосфогипса, природног гипса и комерцијалне гипсане плоче. Узорци фосфогипса су узети са депоније хемијске индустрије фосфорне киселине у Прахову, у Србији, док су узорци природног гипса и комерцијалне гипсане плоче набављени са оближњих продајних мјеста. За потребе овога рада ће бити кориштени искључиво резултати везани за узорке фосфогипса.

Прахово се налази на обали Дунава, на тремеђи Србије, Румуније и Бугарске, и припада Доњем сливу Дунава. У Прахову је, 1960. године основана ИХП Прахово, првенствено као фабрика суперфосфата. ИХП Прахово је основана од стране РТБ БОР, и то све у циљу рјешавања проблема неутрализације сумпорне киселине. У августу 2012. године Elixir Group приватизује ИХП Прахово, након чега је производња фосфорне киселине и минералних ђубрива настављена.



Слика 21. Прахово, Србија - одлагалиште фосфогипса [Išek et al., 2020]



Слика 22. Одлагалиште фосфогипса у непосредној близини комплекса хемијске индустрије у Прахову [Zavod za zaštitu prirode Srbije, 2020]

Што се процеса припреме узорака тиче, узорци су сушени између осам и десет сати на температури од 110°C, након чега су уситњени и хомогенизовани до ситног праха. Мјерење нивоа радиоактивности је вршено гама спектрометријском методом. Уситњени и хомогенизовани узорци су првенствено пренесени у цилиндричне посуде пречника 6,7 cm и висине 6,2 cm, након чега су затворени тефлонском траком како би ослобађање  $^{222}\text{Rn}$  из посуда било спријечено. [Kuzmanović, 2020-1]

## 5.2 Одређивање садржаја радионуклида у узорцима фосфогипса

Мјерење је вршено четрдесет дана након припреме узорака, након што је успостављена радиоактивна равнотежа између  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{222}\text{Rn}$ . Анализа узорака је вршена према стандардној методи *IAEA TRS 295*. [Kuzmanović, 2020]

Међународна агенција за атомску енергију (*IAEA*) је, 1989. године, објавила технички извјештај *IAEA TRS 295*, под називом "Мјерење радионуклида у храни и животној средини - Приручник". Овај извјештај даје смјернице и стандардизоване методе за мјерење радионуклида у животној средини и храни, обухвата основне принципе и технике мјерења радионуклида (гама спектрометрију, алфа спектрометрију, др.), даје детаљне процедуре за узорковање, припрему и анализу узорака (и то за различите врсте узорака као што су: земљиште, ваздух, вода и храна), а поред свега наведеног пружа и информације о осигурању и контроли квалитета како би вјеродостојна и репродуцибилна мјерења радионуклида била осигурана. Смјернице и протоколи дати у извјештају *IAEA TRS 295* се користе као међународни стандарди за мониторинг радиоактивности у животној средини и процјену безбједности хране, али и као важан референтни документ за лабораторије које се баве анализом радионуклида у циљу показивања усаглашености са успостављеном методологијом и квалитетом. [IAEA, 1989]

За одређивање концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у узорцима фосфогипса је кориштена метода нискофонске гама спектрометрије. Ова метода представља аналитичку технику која се користи за детекцију и квантификацију ниских концентрација радионуклида у испитиваним узорцима. Подразумијева употребу детектора високе осјетљивости (обично HPGe, односно High Purity Germanium), који су смјештени у посебне заштите (оне се праве од материјала са високим редним бројем), чија је улога смањење утицаја позадинског зрачења које потиче из околине, чиме је омогућено мјерење веома ниских концентрација активности у узорцима (чак и концентрација активности које су ниже од нивоа позадинског зрачења). Детектовано гама зрачење се анализира спектрометријски, чиме је омогућена идентификација и квантификација појединачних радионуклида у узорцима. [Gilmore, 2008]

Вријеме мјерења за сваки узорак је било 72000 s, док је маса узорака варијала између 250 g и 300 g. Садржај радионуклида у испитиваним узорцима је мјерен помоћу HPGe гама спектрометра произвођача Canberra, са релативном ефикасношћу од 36% и резолуцијом од 1,9 keV за гама пик  $^{60}\text{Co}$  на енергији од 1332 keV. Детектор се налазио у кућишту сачињеном од два слоја, и то: оловног, дебљине 12 cm и бакарног слоја, дебљине 3 mm. Када фотони падају на олово, може доћи до избацавања електрона из унутрашњих љуски атома олова, при чему унутрашњим љускама настају шупљине. Ове шупљине попуњавају електрони из виших љуски уз емисију карактеристичног зрачења. Улога бакарног слоја јесте да спријечи продирање карактеристичних X-зрака, који настају при интеракцији упадних фотона са атомима олова. Енергије ових зрака су у опсегу од 75 keV до 85 keV ( $K_\alpha$  и  $K_\beta$  зраци, који настају при преласку електрона из *L*-љуске у *K*-љуску у атому олова). Прикупљање и анализа гама спектра су вршени



помоћу *Canberra Genie 2000* софтвера. Интегрална брзина бројања у опсегу енергија од 30 keV до 3000 keV је износила  $2 \text{ s}^{-1}$ . [Kuzmanović, 2020-1]

Прецизна калибрација гама спектрометријског система је неопходна како би мјерна несигурност при одређивању концентрације активности радионуклида била мала (<10%). Калибрација гама спектрометријског система је, у овом случају, извршена помоћу референтног радиоактивног материјала хомогено распршеног у силиконској смоли облика цилиндра, запремине  $V = 250 \text{ cm}^3$ , пречника 68 mm, висине 70 mm. Корекција ефекта самоапсорпције, која је посљедица различитих матричних густина и може имати негативан утицај на ефикасност детекције, је извршена помоћу програма *ANGLE*. [Kuzmanović, 2020-1]

Минимална детектована активност (*MDA*) представља доњу границу концентрације активности датог радионуклида коју мјерни систем може поуздано да детектује у датим условима мјерења, односно, то је најмања могућа вриједност концентрације активности радионуклида коју је могуће квантификовати са одређеним нивоом статистичке поузданости. Минимална детектована активност се рачуна на основу статистичке анализе броја импулса позадинског зрачења и ефикасности мјерног система, а омогућава одређивање минималне вриједности концентрације активности, која је уствари гранична вриједност (ако је вриједност концентрације активности појединачног радионуклида испод ове границе, можемо рећи да присуство тога радионуклида у испитиваном узорку није статистички значајно). Пошто је у узорцима са ниским концентрацијама активности неопходна тачна квантификација присутних радионуклида, ова величина има важну улогу при анализи истих. [Currie, 1968]

Минималну детектовану активност, код мјерења гама зрачења, је могуће процијенити на основу следеће једначине [Kuzmanović, 2020-1]:

$$MDA = \frac{F_c \times \sqrt{\sigma_B}}{\epsilon \times P_\gamma \times t \times M} B_q \text{ kg}^{-1}$$

Величина  $F_c$  представља статистички фактор покривености и износи 1.64 (уз ниво повјерења од 95%),  $\sigma_B$  представља стандардну девијацију позадинског зрачења у подручју од интереса и једнака је квадратном коријену броја импулса позадинског спектар,  $\epsilon$  представља мјеру ефикасности детекторског система (у овом случају гама спектрометра) да детектује фотоне одређене енергије  $E$  и мјери њихов фотопик,  $P_\gamma$  представља принос гама зрачења по распаду,  $t$  представља вријеме мјерења узорка (изражено у секундама), док је  $M$  маса осушеног узорка (изражено у kg). [Kuzmanović, 2020-11]

За добијене концентрације активности је могуће израчунати мјерну несигурност и то кориштењем следеће једначине [Kuzmanović, 2020-11]:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{1}{\sum \frac{1}{\sigma_i}}}$$

Она у обзир узима статистичку несигурност али и несигурност ефикасности при одговарајућој енергији. Величина  $\sigma_A$  представља мјерну несигурност за дату измјерену концентрацију активности одговарајућег радионуклида, док величина  $\sigma_i$  представља мјерну несигурност која је изведена на појединачним енергијама гама пикова одговарајућих радионуклида. Рачунање статистичке несигурности радиоактивног

распада је извршено помоћу софтвера *Genie2000*, при чему су све мјерне несигурности дате на нивоу повјерења од 95%. [Kuzmanović 2020-1]

### 5.3 Резултати мјерења

Вриједности концентрација активности, појединачних радионуклида, које представљају полазне тачке процјене ризика су преузете из докторске дисертације ”*Корелација радиолошких и структурних карактеристика грађевинских материјала*”, чији је аутор др Предраг Кузмановић. [Kuzmanović, 2020-2]

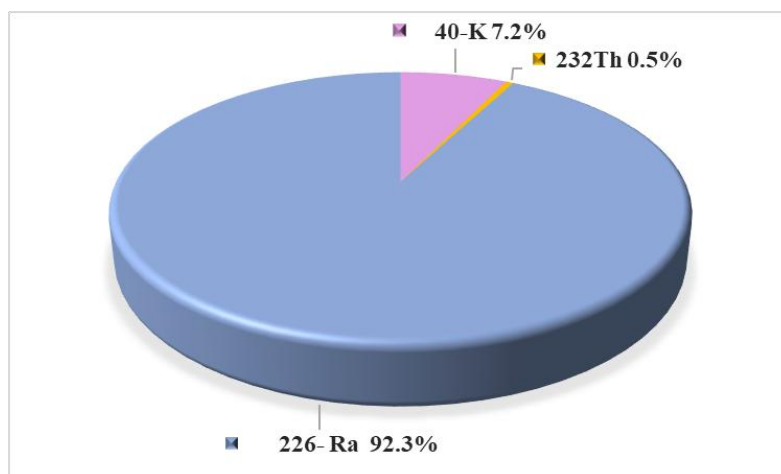
За осам узорака фосфогипса, узетих са одлагалишта фосфогипса у Србији, су измјерене концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ . Два узорка су сирови узорци, са удјелом влаге од 15.8% и 17.2%, док је преосталих шест узорака, како је већ поменуто, сушено на температури од 110°C. Добијене просјечне вриједности износе:  $600\pm 28 \text{ Bq kg}^{-1}$  за  $^{226}\text{Ra}$ ,  $3.2\pm 0.3 \text{ Bq kg}^{-1}$  за  $^{232}\text{Th}$  и  $47\pm 16 \text{ Bq kg}^{-1}$  за  $^{40}\text{K}$ . Релативна заступљеност  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у односу на њихове просјечне вриједности у узорцима фосфогипса је 92.3% за  $^{226}\text{Ra}$ , 0.5% за  $^{232}\text{Th}$  и 7.2% за  $^{40}\text{K}$ . [Kuzmanović, 2020-2]

Табела 6. Концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у узорцима фосфогипса узетим са одлагалишта фосфогипса у Србији [Kuzmanović, 2020]

| Узорак                                    | Припрема       | Маса узорка [g] | Садржај влаге [%] | Концентрација активности [Bq kg <sup>-1</sup> ] |                   |                 |
|-------------------------------------------|----------------|-----------------|-------------------|-------------------------------------------------|-------------------|-----------------|
|                                           |                |                 |                   | $^{226}\text{Ra}$                               | $^{232}\text{Th}$ | $^{40}\text{K}$ |
| PG1                                       | сиров          | 150.9           | 15.8              | 488±15                                          | 2.8±1.0           | <12             |
| PG2                                       | сиров          | 179.5           | 17.2              | 520±11                                          | 3.4±1.0           | <10             |
| PG3                                       | сушен на 110°C | 190.6           | <1                | 737±8                                           | 3.3±1.0           | 126             |
| PG4                                       | сушен на 110°C | 183.3           | <1                | 512±5                                           | 4.5±0.9           | <5              |
| PG5                                       | сушен на 110°C | 207.2           | <1                | 626±14                                          | 2.3±0.9           | 117±7           |
| PG6                                       | сушен на 110°C | 228.6           | <1                | 649±9                                           | 2.1±0.8           | <17             |
| PG7                                       | сушен на 110°C | 219.8           | <1                | 609±4                                           | 3.9±0.8           | 105±6           |
| PG8                                       | сушен на 110°C | 236.6           | <1                | 656±4                                           | 3.1±0.9           | 101±6           |
| Опсег                                     |                |                 |                   | 488-737                                         | 2.1-4.5           | <5-117          |
| Средња вриједност ± стандардна девијација |                |                 |                   | 600±28                                          | 3.18±0.26         | 47±16           |
| Просјек у свијету                         |                |                 |                   | 50                                              | 50                | 500             |

Добијене вриједности концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$  су чак дванаест пута веће од дозвољене вриједности концентрације активности за грађевинске материјале у свијету,

која износи  $50 \text{ Bqkg}^{-1}$ , док су концентрације активности  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  унутар дозвољених граничних вриједности. [Kuzmanović, 2020-2]



Слика 23. Релативна заступљеност  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у фосфогипсу, у односу на просјечне вриједности

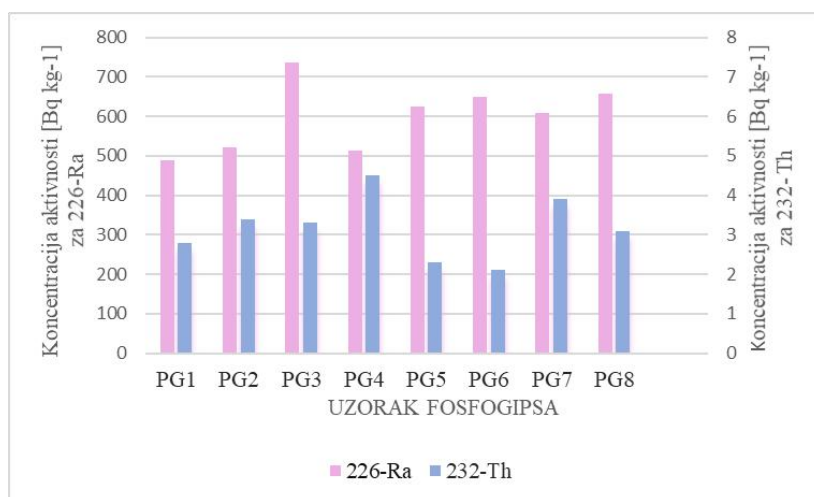
## 6. Процјена ризика

Процес процјене помоћу *ERICA* програма подразумева процјену ризика и потенцијалног радиолошког утицаја на флору и фауну екосистема за који вршимо процјену. Величина која је од значаја приликом процеса процјене јесте коефицијент ризика ( $RQ$ ), који је могуће израчунати помоћу релација наведених у поглављу 2.8.

*ERICA* програм је кориштен за процјену утицаја јонизујућег зрачења на биљне и животињске врсте карактеристичне за екосистем Дунава, у близини Прахова, прецизније, кориштена је верзија програма *ERICA 2.0*, а процјена је вршена за слатководни и копнени екосистем. Програм омогућава процјену у три ранга ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ), а одабир ранга у коме ћемо вршити процјену зависи од вриједности коефицијента ризика ( $RQ$ ), и то на тај начин да ако је вриједност коефицијента ризика ( $RQ$ ) изнад граничне вриједности (већа од јединице), прелазимо у следећи ранг, у супротном, односно ако је вриједност коефицијента ризика ( $RQ$ ) испод граничне вриједности, завршавамо процес процјене. Вриједност коефицијента ризика ( $RQ$ ) која је већа од јединице сугерише да постоји одређени ризик за флору и фауну екосистема за који се врши процјена.

### 6.1 Процјена ризика и тумачење добијених резултата у случају слатководног екосистема

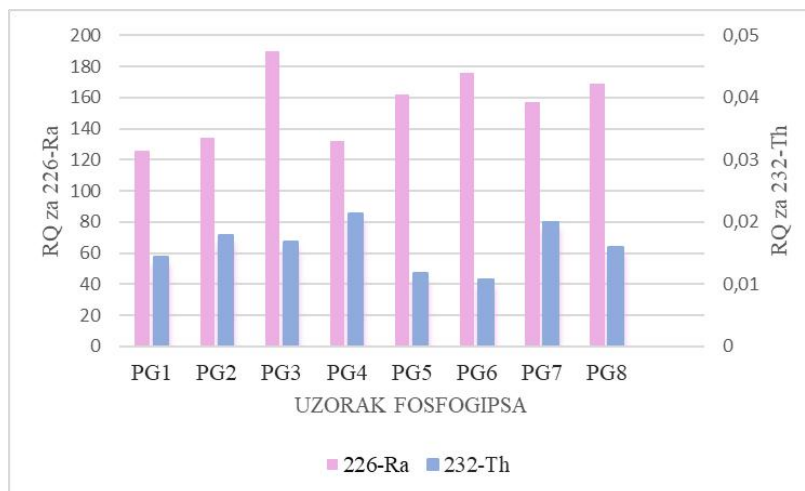
Процјена у оквиру првог ранга ( $T_1$ ) подразумева одабир радионуклида и унос одговарајућих вриједности концентрација активности за изабране радионуклиде. Вриједности концентрација активности за наведене радионуклиде су узете из табеле Табела 5., и представљају улазне вриједности за процјену, а процјена је извршена за концентрације активности сваког од осам узорака фосфогипса појединачно, а затим и за средњу вриједност концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ .



Слика 24. Концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  у узорцима фосфогипса

На основу дијаграма приказаног на слици Слика 24. уочавамо да су концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$  код свих осам узорака фосфогипса много веће у односу на концентрације активности  $^{232}\text{Th}$ , док на основу дијаграма приказаног на слици Слика 25. уочавамо да су вриједности коефицијента ризика за  $^{232}\text{Th}$  мање од јединице, док су

поменуте вриједности за  $^{226}\text{Ra}$  знатно веће од јединице и то за свих осам узорак фосфогипса.



Слика 25. Вриједности коефицијента ризика за  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  за водени екосистем

Резултати добијени процјеном у оквиру првог ранга ( $T_1$ ) указују на то да је процес процјене потребно наставити у оквиру следећег ранга ( $T_2$ ).

Први корак приликом процјене у оквиру другог ранга је одабир екосистема, радионуклида и референтних организама. Врсте екосистема које су од интереса за процјену су слатководни и копнени екосистем. Радионуклиди од интереса су  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ , док  $^{40}\text{K}$  није узет у обзир, пошто је он биогени елемент па концентрације активности које потичу од  $^{40}\text{K}$  искључујемо из процеса процјене. Што се референтних организама тиче, у процес процјене су укључени сви референтни организми обухваћени *ERICA* програмом, карактеристични за слатководне екосистеме (водоземци, бентичке рибе, птице, ракови, ларве инсеката, сисари, шкољке, пужеви, пелагичне рибе, фитопланктон, рептили, васкуларне биљке и зоопланктон). Следећи корак у процесу процјене подразумева одабир скрининг вриједности брзине дозе и фактора несигурности ( $UF$ ). Скрининг вриједност брзине дозе је гранична вриједност брзине дозе, а уствари представља показатељ потребе за наставком процеса процјене у вишем рангу. Процес процјене је потребно наставити ако су процијењене вриједности брзине дозе веће у односу на скрининг вриједност брзине дозе. Приликом одабира скрининг вриједности брзине дозе програм нуди три опције, а за потребе овога рада је одабрана вриједност од  $10 \mu\text{Gy h}^{-1}$ . Под претпоставком да је функција расподеле коефицијента ризика експоненцијална, одабрана је вриједност фактора несигурности која одговара средњем нивоу повјерења,  $UF=3$ . Процес процјене даље захтијева познавање вриједности дистрибуционх коефицијената, односа концентрација и фактора заузећа за одабране радионуклиде и организме. Програм предлаже вриједности фактора заузећа, мада је ове вриједности могуће модификовати у случају организама који само дио од укупног времена проводе на датој локацији. Локације које нуди програм подразумевају следеће: на површини воде, у води, на површини седимента и у седименту, за слатководне екосистеме, и на површини тла, испод површине тла и у ваздуху, за копнене екосистеме. У случају да вриједности дистрибуционх коефицијената и односа концентрација за дати радионуклид нису познате, можемо користити податке из базе података, процијенити њихове вриједности поређењем са сличним ситуацијама, користити спектар вриједности или можемо доћи до ових вриједности експерименталним путем. Последњи корак у процесу процјене је унос вриједности концентрација активности одабраних радионуклида.

Табела 7. Укупна брзина дозе по организму, очекивана и процијењена вриједност коефицијента ризика за концентрације активности појединачних узорака фосфогипса

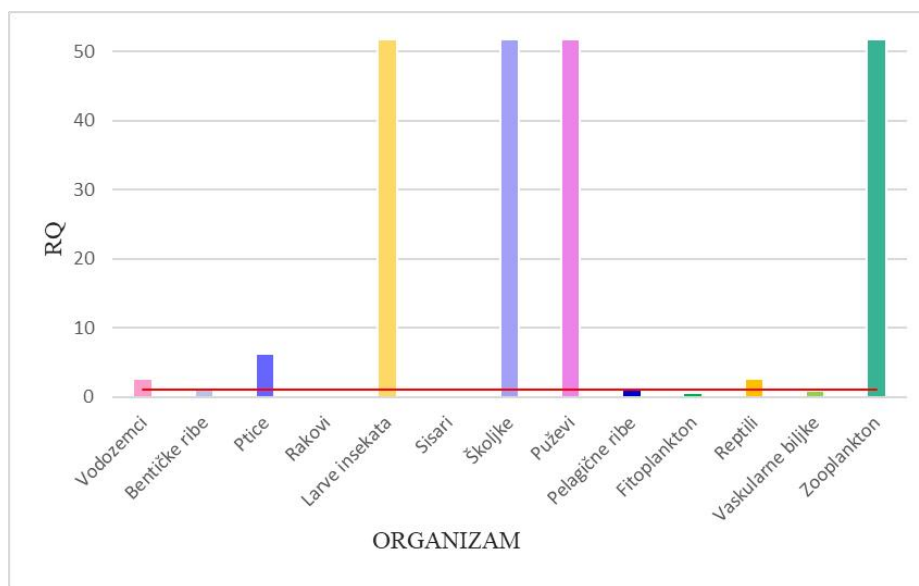
| УЗОРАК    |                  | PG1                                                   |                     |                      | PG2                                                   |                     |                      |
|-----------|------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|
| ОРГАНИЗАМ |                  | Total Dose Rate per organism [ $\mu\text{Gyh}^{-1}$ ] | RQ (expected value) | RQ (estimated value) | Total Dose Rate per organism [ $\mu\text{Gyh}^{-1}$ ] | RQ (expected value) | RQ (estimated value) |
|           | Водоземци        | 21.20                                                 | 2.12                | 6.37                 | 22.60                                                 | 2.26                | 6.79                 |
|           | Бентичке рибе    | 8.61                                                  | 0.86                | 2.58                 | 9.17                                                  | 0.92                | 2.75                 |
|           | Птице            | 50.60                                                 | 5.06                | 15.20                | 54.00                                                 | 5.40                | 16.2                 |
|           | Ракови           | 2.55                                                  | 0.26                | 0.77                 | 2.72                                                  | 0.27                | 0.82                 |
|           | Ларве инсеката   | 42.00                                                 | 42.10               | 126.00               | 449                                                   | 44.9                | 135.00               |
|           | Сисари           | 0.00                                                  | 0.00                | 0.00                 | 0.00                                                  | 0.00                | 0.00                 |
|           | Шкољке           | 422.00                                                | 42.20               | 126.00               | 449                                                   | 44.9                | 135.00               |
|           | Пужеви           | 421.00                                                | 42.10               | 126.00               | 449                                                   | 44.9                | 135.00               |
|           | Пелагичне рибе   | 8.39                                                  | 0.84                | 2.52                 | 8.49                                                  | 0.89                | 2.68                 |
|           | Фитопланктон     | 4.16                                                  | 0.42                | 1.25                 | 4.44                                                  | 0.44                | 1.33                 |
|           | Рептили          | 21.50                                                 | 2.15                | 6.44                 | 22.90                                                 | 2.29                | 6.87                 |
|           | Васкуларне биљке | 7.35                                                  | 0.74                | 2.20                 | 7.83                                                  | 0.78                | 2.35                 |
|           | Зоопланктон      | 420.00                                                | 42.00               | 126.00               | 448                                                   | 44.8                | 134                  |
| УЗОРАК    |                  | PG3                                                   |                     |                      | PG4                                                   |                     |                      |
| ОРГАНИЗАМ |                  | Total Dose Rate per organism [ $\mu\text{Gyh}^{-1}$ ] | RQ (expected value) | RQ (estimated value) | Total Dose Rate per organism [ $\mu\text{Gyh}^{-1}$ ] | RQ (expected value) | RQ (estimated value) |
|           | Водоземци        | 32.10                                                 | 3.21                | 9.63                 | 22.30                                                 | 2.23                | 6.69                 |
|           | Бентичке рибе    | 13.00                                                 | 1.30                | 3.90                 | 9.03                                                  | 0.90                | 2.71                 |
|           | Птице            | 76.50                                                 | 7.65                | 22.90                | 53.10                                                 | 5.31                | 15.90                |
|           | Ракови           | 3.85                                                  | 0.39                | 1.16                 | 2.68                                                  | 0.27                | 0.80                 |
|           | Ларве инсеката   | 636.00                                                | 63.6                | 191.00               | 442.00                                                | 44.20               | 133.00               |
|           | Сисари           | 0.01                                                  | 0.00                | 0.00                 | 0.00                                                  | 0.00                | 0.00                 |
|           | Шкољке           | 637                                                   | 63.70               | 191.00               | 442.00                                                | 44.20               | 133.00               |
|           | Пужеви           | 636                                                   | 63.60               | 191.00               | 442.00                                                | 44.20               | 133.00               |
|           | Пелагичне рибе   | 12.70                                                 | 1.27                | 3.80                 | 8.81                                                  | 0.88                | 2.64                 |
|           | Фитопланктон     | 6.29                                                  | 0.63                | 1.89                 | 4.37                                                  | 0.44                | 1.31                 |
|           | Рептили          | 32.4                                                  | 3.24                | 9.73                 | 22.5                                                  | 2.25                | 6.76                 |
|           | Васкуларне биљке | 11.10                                                 | 1.11                | 3.33                 | 7.72                                                  | 0.77                | 2.32                 |
|           | Зоопланктон      | 635                                                   | 63.50               | 190                  | 441.00                                                | 44.10               | 132.00               |

| УЗОРАК    |                     | PG5                                                             |                           |                            | PG6                                                             |                           |                            |
|-----------|---------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|
|           |                     | Total<br>Dose<br>Rate per<br>organism<br>[ μGyh <sup>-1</sup> ] | RQ<br>(expected<br>value) | RQ<br>(estimated<br>value) | Total<br>Dose<br>Rate per<br>organism<br>[ μGyh <sup>-1</sup> ] | RQ<br>(expected<br>value) | RQ<br>(estimated<br>value) |
| ОРГАНИЗАМ | Водоземци           | 27.30                                                           | 2.73                      | 8.18                       | 28.30                                                           | 2.83                      | 8.48                       |
|           | Бентичке рибе       | 11.00                                                           | 1.10                      | 3.31                       | 11.40                                                           | 1.14                      | 3.43                       |
|           | Птице               | 65.00                                                           | 6.50                      | 19.50                      | 67.40                                                           | 6.74                      | 20.20                      |
|           | Ракови              | 3.27                                                            | 0.33                      | 0.98                       | 3.39                                                            | 0.34                      | 1.02                       |
|           | Ларве<br>инсеката   | 540.00                                                          | 54.00                     | 162.00                     | 560.00                                                          | 56.00                     | 168.00                     |
|           | Сисари              | 0.00                                                            | 0.00                      | 0.00                       | 0.00                                                            | 0.00                      | 0.00                       |
|           | Шкољке              | 541.00                                                          | 54.10                     | 162.00                     | 561.00                                                          | 56.10                     | 168.00                     |
|           | Пужеви              | 540.00                                                          | 54.00                     | 162.00                     | 560.00                                                          | 56.00                     | 168.00                     |
|           | Пелагичне<br>рибе   | 10.80                                                           | 1.08                      | 3.23                       | 11.20                                                           | 1.12                      | 3.35                       |
|           | Фитопланктон        | 5.34                                                            | 0.53                      | 1.60                       | 5.54                                                            | 0.55                      | 1.66                       |
|           | Рептили             | 27.60                                                           | 2.76                      | 8.27                       | 28.60                                                           | 2.86                      | 8.57                       |
|           | Васкуларне<br>биљке | 9.42                                                            | 0.94                      | 2.83                       | 9.77                                                            | 0.98                      | 2.93                       |
|           | Зоопланктон         | 539.00                                                          | 53.90                     | 162.00                     | 559.00                                                          | 55.9                      | 168.00                     |
|           | УЗОРАК              |                                                                 | PG7                       |                            |                                                                 | PG8                       |                            |
|           |                     | Total<br>Dose<br>Rate per<br>organism<br>[ μGyh <sup>-1</sup> ] | RQ<br>(expected<br>value) | RQ<br>(estimated<br>value) | Total<br>Dose<br>Rate per<br>organism<br>[ μGyh <sup>-1</sup> ] | RQ<br>(expected<br>value) | RQ<br>(estimated<br>value) |
| ОРГАНИЗАМ | Водоземци           | 26.50                                                           | 2.65                      | 7.96                       | 28.60                                                           | 2.86                      | 8.57                       |
|           | Бентичке рибе       | 10.70                                                           | 1.07                      | 3.22                       | 11.60                                                           | 1.16                      | 3.47                       |
|           | Птице               | 63.20                                                           | 63.20                     | 19.00                      | 68.10                                                           | 6.81                      | 20.40                      |
|           | Ракови              | 3.19                                                            | 0.32                      | 0.96                       | 3.43                                                            | 0.34                      | 1.03                       |
|           | Ларве<br>инсеката   | 525.00                                                          | 52.50                     | 158.00                     | 566.00                                                          | 56.60                     | 170.00                     |
|           | Сисари              | 0.00                                                            | 0.00                      | 0.00                       | 0.00                                                            | 0.00                      | 0.00                       |
|           | Шкољке              | 526.00                                                          | 52.60                     | 158.00                     | 567.00                                                          | 56.70                     | 170.00                     |
|           | Пужеви              | 526.00                                                          | 52.60                     | 158.00                     | 567.00                                                          | 56.50                     | 170.00                     |
|           | Пелагичне<br>рибе   | 10.50                                                           | 1.05                      | 3.14                       | 11.30                                                           | 1.13                      | 3.38                       |
|           | Фитопланктон        | 5.20                                                            | 0.52                      | 1.56                       | 5.60                                                            | 0.56                      | 1.68                       |
|           | Рептили             | 26.80                                                           | 2.68                      | 8.04                       | 28.90                                                           | 2.89                      | 8.66                       |
|           | Васкуларне<br>биљке | 9.17                                                            | 0.92                      | 2.75                       | 9.88                                                            | 0.99                      | 2.96                       |
|           | Зоопланктон         | 524.00                                                          | 52.4                      | 157.00                     | 565.00                                                          | 56.50                     | 169.00                     |

Табела 8. Укупна брзина дозе по организму, очекивана и процијењена вриједност коефицијента ризика за средње вриједности концентрација активности радионуклида

|           |                  | Total Dose<br>Rate per<br>organism<br>[ $\mu\text{Gy h}^{-1}$ ] | RQ (expected<br>value) | RQ (estimated<br>value) |
|-----------|------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|
|           |                  |                                                                 |                        |                         |
| ОРГАНИЗАМ | Водоземци        | 26.10                                                           | 2.61                   | 7.84                    |
|           | Бентичке рибе    | 10.60                                                           | 1.06                   | 3.18                    |
|           | Птице            | 62.30                                                           | 6.23                   | 18.70                   |
|           | Ракови           | 3.14                                                            | 0.31                   | 0.92                    |
|           | Ларве инсеката   | 518.00                                                          | 51.8                   | 155.00                  |
|           | Сисари           | 0.00                                                            | 0.00                   | 0.00                    |
|           | Шкољке           | 518.00                                                          | 51.80                  | 155.00                  |
|           | Пужеви           | 518.00                                                          | 51.80                  | 155.00                  |
|           | Пелагичне рибе   | 10.30                                                           | 1.03                   | 3.10                    |
|           | Фитопланктон     | 5.12                                                            | 0.51                   | 1.54                    |
|           | Рептили          | 26.40                                                           | 2.64                   | 7.92                    |
|           | Васкуларне биљке | 9.03                                                            | 0.90                   | 2.71                    |
|           | Зоопланктон      | 517.00                                                          | 51.70                  | 155.00                  |

Резултати добијени процјеном за слатководни екосистем, у оквиру другог ранга ( $T_2$ ), су приказани у табелама Табела 7. и Табела 8. У табели Табела 8. су приказане вриједности укупне брзине дозе по организму, као и очекиване и процијењене вриједности коефицијента ризика за средње вриједности концентрација активности изабраних радионуклида, за све референтне организме.



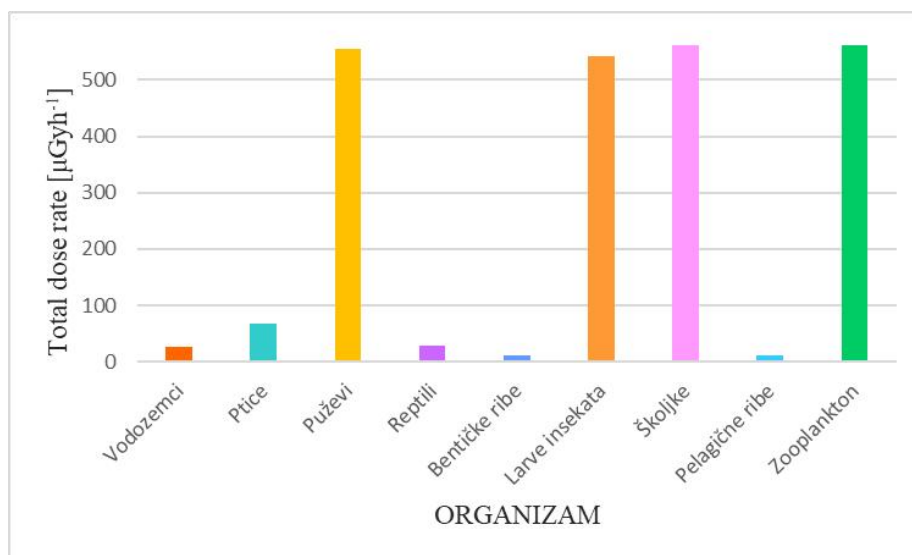
Слика 26. Коефицијент ризика за све референтне организме обухваћене процјеном у слатководном екосистему



На основу табеле Табела 8. уочавамо да су очекивана и процијењена вриједност коефицијента ризика ( $RQ$ ) за ракове и сисаре мање од јединице, за фитопланктон и васкуларне биљке су очекиване вриједности коефицијента ризика ( $RQ$ ) мање од јединице, али су процијењене нешто веће од јединице, очекиване и процијењене вриједности коефицијента ризика ( $RQ$ ) су за бентичке и пелагичне рибе нешто веће од јединице, док су поменуте вриједности коефицијента ризика ( $RQ$ ) за остале организме знатно веће од јединице.

Процјена у оквиру другог ранга ( $T_2$ ) је показала да су вриједности коефицијента ризика ( $RQ$ ) веће од јединице за следеће организме: водоземци, бентичке рибе, пелагичне рибе, птице, ларве инсеката, шкољке, пужеви, рептили и зоопланктон. За наведене организме процјену треба наставити у оквиру трећег ранга ( $T_3$ ).

Дијаграм приказан на слици Слика 27. показује да су процијењене вриједности укупне брзине дозе за пужеве, ларве инсеката, шкољке и зоопланктон изнад вриједности од  $500 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ .



Слика 27. Укупна брзина дозе за све референтне организме обухваћене процјеном у слатководном екосистему

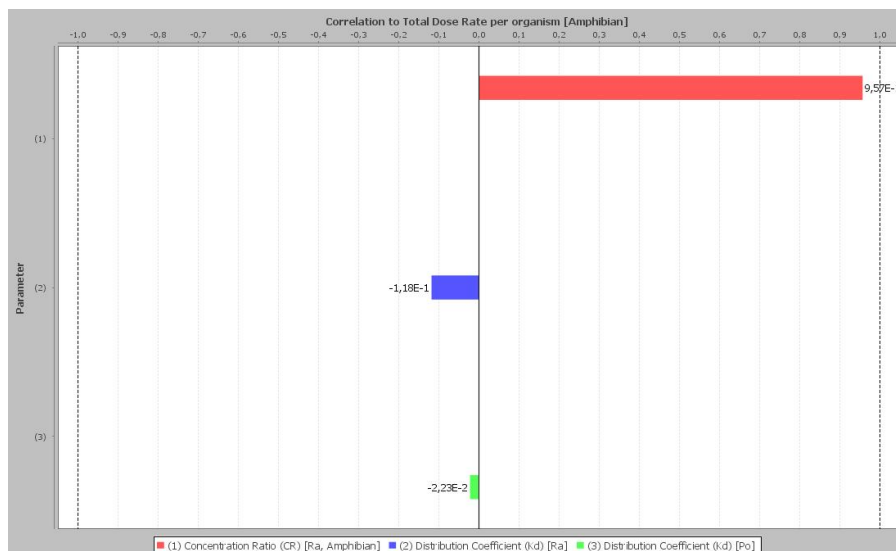
Табела 9. Допринос појединачних радионуклида укупној брзини дозе

| Организам      | Допринос укупној брзини дозе од $^{226}\text{Ra}$ [ $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ ] | Допринос укупној брзини дозе од $^{232}\text{Th}$ [ $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ ] |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Водоземци      | 26.20                                                                                  | $2.02 \times 10^{-5}$                                                                  |
| Птице          | 67.70                                                                                  | $5.23 \times 10^{-5}$                                                                  |
| Пужеви         | 554.00                                                                                 | $1.53 \times 10^{-2}$                                                                  |
| Рептили        | 28.40                                                                                  | $4.73 \times 10^{-4}$                                                                  |
| Бентичке рибе  | 11.70                                                                                  | $7.77 \times 10^{-4}$                                                                  |
| Ларве инсеката | 540.00                                                                                 | $1.63 \times 10^{-2}$                                                                  |
| Шкољке         | 561.00                                                                                 | $1.56 \times 10^{-2}$                                                                  |
| Пелагичне рибе | 11.20                                                                                  | $6.19 \times 10^{-4}$                                                                  |
| Зоопланктон    | 552.00                                                                                 | $1.53 \times 10^{-2}$                                                                  |

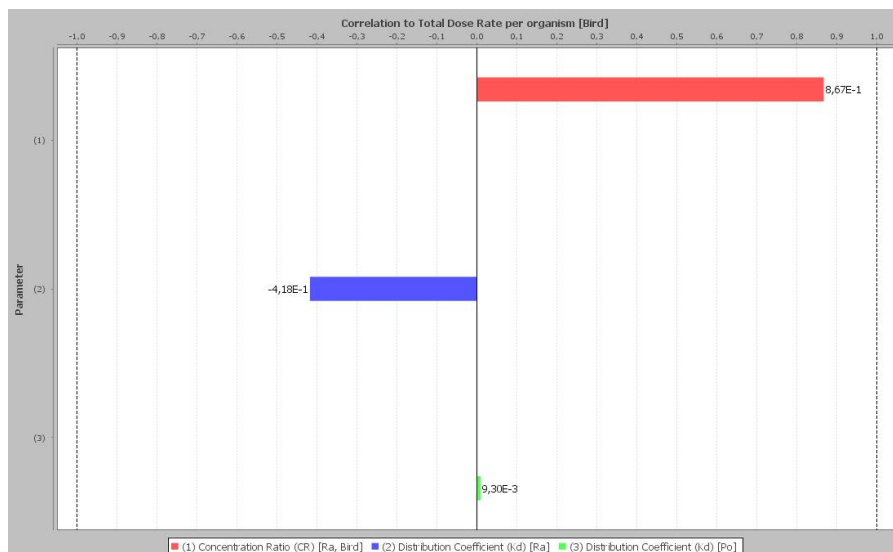
Када је у питању допринос појединачних радионуклида укупној брзини дозе, код свих организама доминантан допринос укупној брзини дозе даје  $^{226}\text{Ra}$ .

Следећи корак процјене у оквиру трећег ранга ( $T_3$ ) подразумева анализу осјетљивости, коју користимо за идентификацију параметара који имају најизраженији утицај на укупну брзину дозе или њене компоненте (спољашња и унутрашња брзина дозе). У случају да анализа осјетљивости покаже да је утицај испитиваних параметара на крајњи резултат процјене јако изражен, потребна су детаљнија испитивања тих параметара, која обично подразумевају додатна експериментала испитивања (терен, лабораторија), чији је циљ прецизније одређивање вриједности испитиваних параметара.

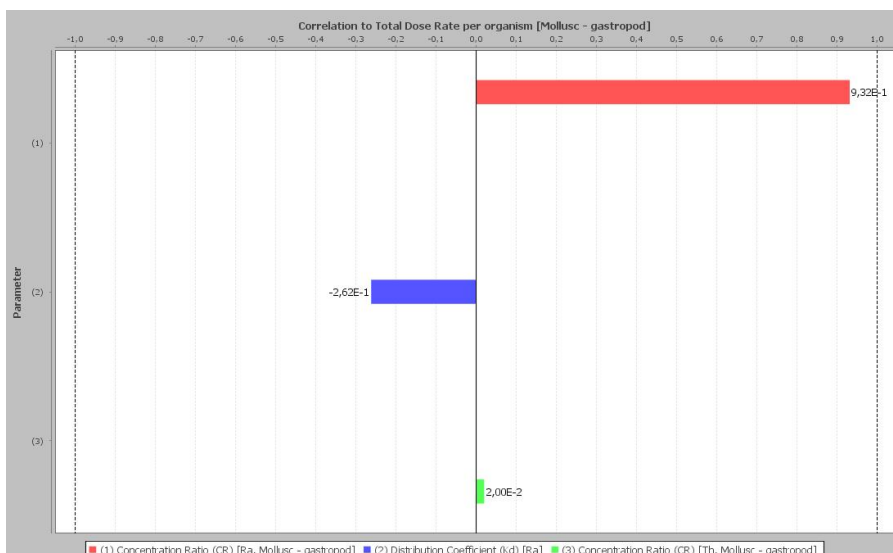
Као што је поменуто у поглављу 2.9, анализа осјетљивости подразумева рачунање коефицијената који описују везу између улазних вриједности/података и крајње тачке процјене. Pearson Correlation Coefficient ( $PCC$ ) подразумева линеарну везу промјенљивих и осјетљив је на екстремне вриједности и расподелу података, док Spearman Rank Correlation Coefficient ( $SRCC$ ) не захтијева линеарност (претпоставка је да је веза монотона: растућа или опадајућа) и мање је осјетљив на екстремне вриједности и расподелу података. За приказ утицаја различитих параметара на крајњу тачку процјене користимо *торнадо* дијаграме. Улога Pearson Correlation Coefficient ( $PCC$ ) и Spearman Rank Correlation Coefficient ( $SRCC$ ) јесте та да се параметри на торнадо дијаграмима распоређују према апсолутној вриједности ових коефицијената, и то од најмањег ка највећем. Ови коефицијенти уствари омогућавају идентификацију параметара који су од кључног значаја за крајњи резултат. Дужина хоризонталних стубова на дијаграмима одговара апсолутној вриједности одговарајућег коефицијента, док предзнак коефицијента одређује да ли је његов утицај на крајњи резултат позитиван или негативан.



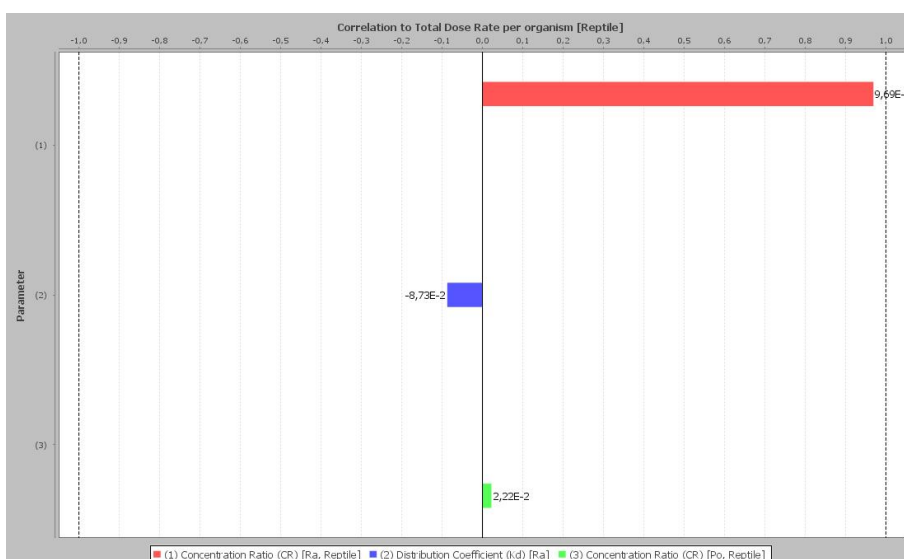
Слика 28. Торнадо дијаграм - водоземци



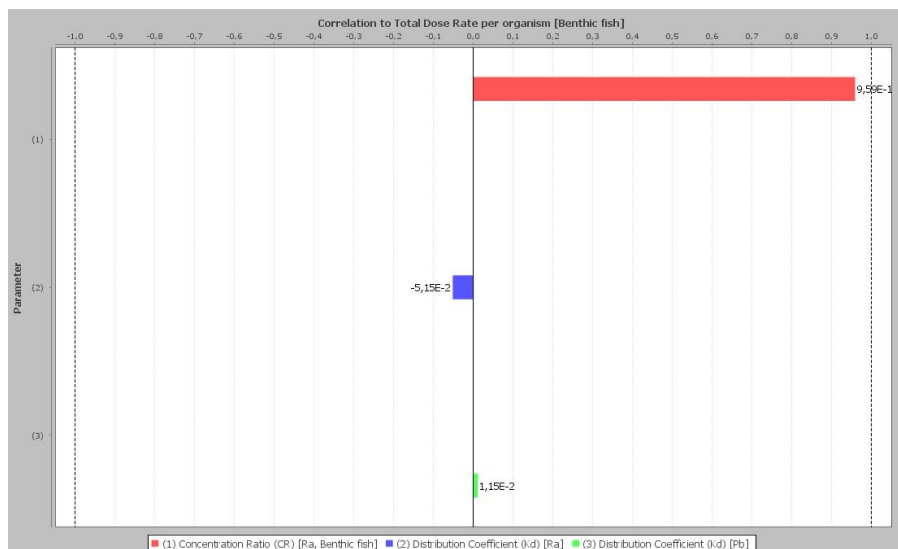
Слика 29. Торнадо дијаграм - птице



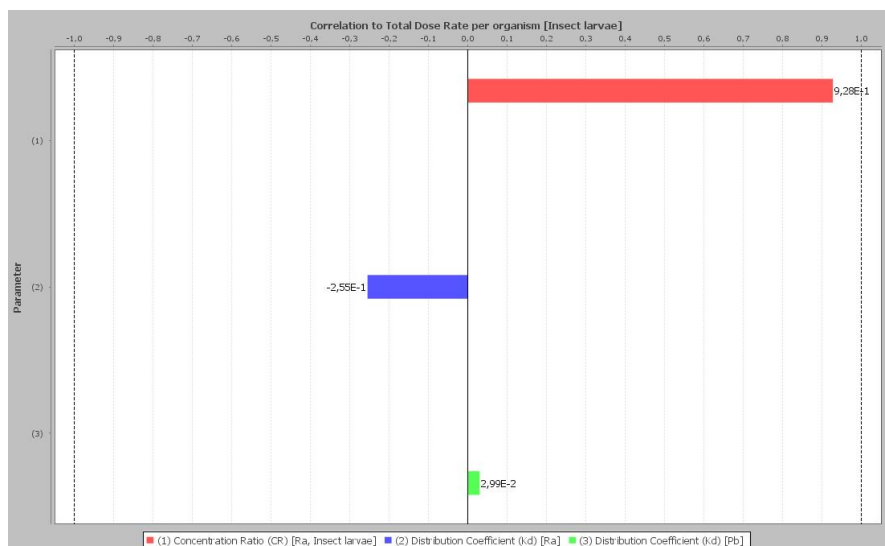
Слика 30. Торнадо дијаграм - пужеви



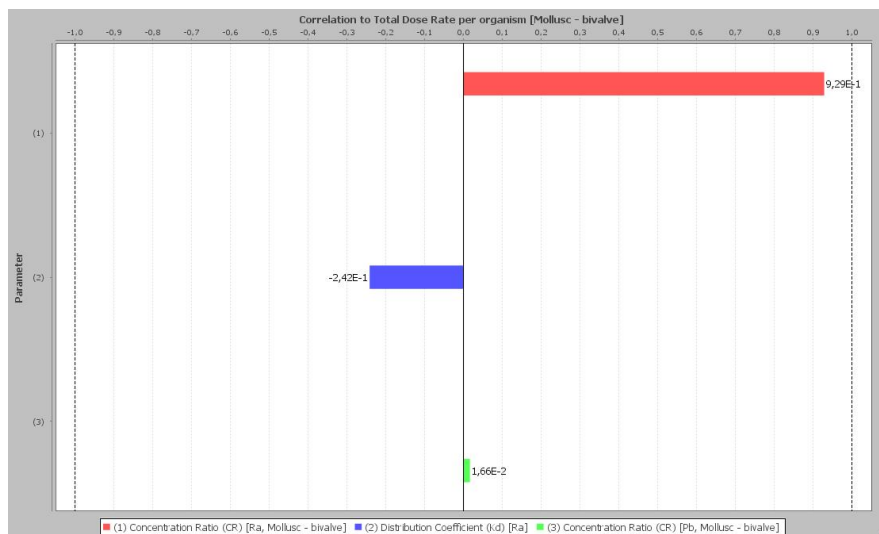
Слика 31. Торнадо дијаграм - рептили



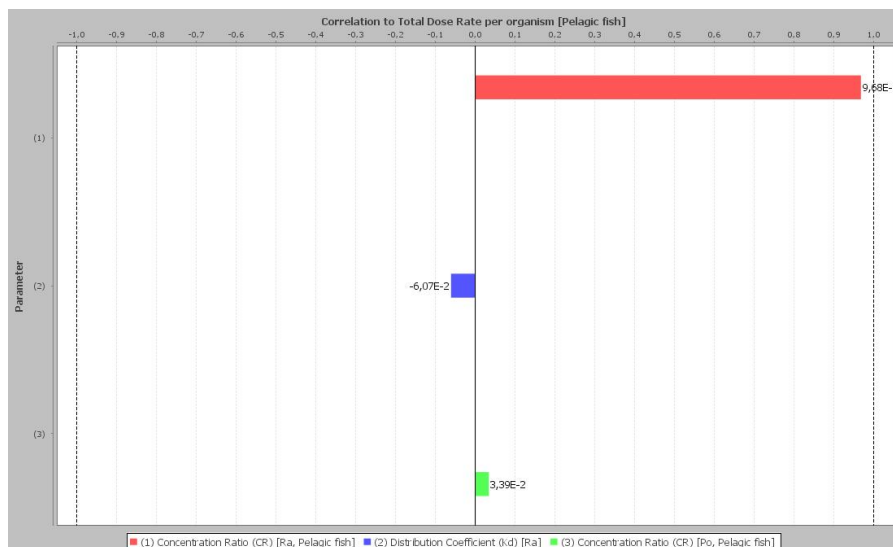
Слика 32. Торнадо дијаграм - бентичке рибе



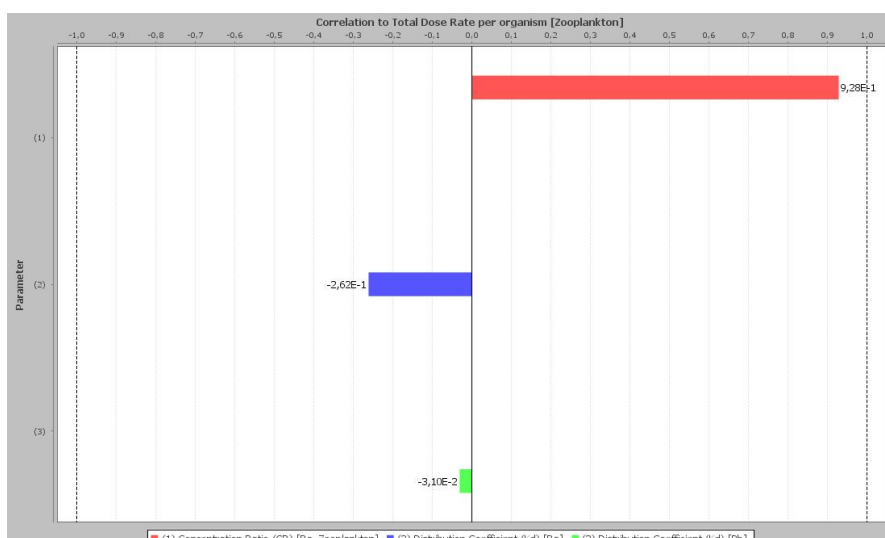
Слика 33. Торнадо дијаграм - ларве инсеката



Слика 34. Торнадо дијаграм - шкољке



Слика 35. Торнадо дијаграм - пелагичне рибе



Слика 36. Торнадо дијаграм - зоопланктон

Добијени торнадо дијаграми приказују на који начин и који параметри утичу на укупну брзину дозе. Програм омогућава да подесимо број параметара које желимо да прикажемо, при чему је минималан број параметара које можемо изабрати три, док је максималан број параметара које можемо изабрати није ограничен, али се због прегледности дијаграма не препоручује одабир великог броја параметара. Параметри који су од највећег значаја на укупну брзину дозе су у случају одабраних референтних организама и радионуклида у слатководном екосистему су:

- Однос концентрација радијума CR [Ra]
- Коефицијент расподеле радијума Kd [Ra]
- Док је трећи параметар различит за различите организме

Однос концентрација (CR) је параметар који представља однос концентрације активности радионуклида у референтном организму и концентрације активности радионуклида у средини у којој се организам налази, односно, то је параметар који нам говори колико се пута концентрација активности датог радионуклида у организму разликује од концентрације активности тога радионуклида у средини. Торнадо

дијаграми, приказани на сликама од *Слика 28.* до *Слика 36.*, показују да односу концентрација радијума, за све референтне организме, одговарају позитивне вриједности SRCC коефицијената, при чему максимална вриједност SRCC коефицијента износи 0.969 за рептиле, док минимална вриједност SRCC коефицијента износи 0.867 и то за птице. SRCC коефицијент може да има вриједности од -1 до 1, при чему нам вриједност -1 говори да са повећањем једне величине друга опада, вриједност 0 говори да не постоји монотона зависност међу разматраним величинама, док вриједност 1 говори да се са повећањем једне величине повећава и друга. Вриједности SRCC коефицијената веће од 0.5 говоре да је постоји јака позитивна веза међу разматраним величинама, док вриједности мање од -0.5 говоре да постоји јака негативна веза међу разматраним величинама. Вриједности SRCC коефицијената приказане на торнадо дијаграмима (*Слика. 28. - 36.*) су позитивне и говоре да је веза између односа концентрација радијума и укупне брзине дозе позитивна, односно, да ће са порастом вриједности односа концентрација радијума расти и вриједност укупне брзине дозе. На основу ових вриједности је могуће закључити да се радијум акумулише у организмима, што значи да што је већа вриједност односа концентрација радионуклида, то је већа и укупна доза коју организам прими.

Коефицијент расподеле ( $K_d$ ) описује начин на који се дати радионуклид распоређује међу различитим фазама у средини, на примјер, међу водом и седиментом. Дијаграми показују да су вриједности SRCC коефицијената које одговарају коефицијентима расподеле радијума негативне, што говори да је веза између коефицијента расподеле радијума и укупне брзине дозе негативна. Овакве вриједности коефицијента расподеле говоре да се радијум више задржава у воденој фази, па је укупна доза коју организми примају већа.

Што се тиче трећег параметра, у зависности од врсте референтног организма уочавамо да се ради о следећим параметрима:  $K_d (Po)$  за водоземце и птице,  $CR (Po)$  за рептиле и пелагичне рибе,  $CR (Th)$  за пужеве,  $K_d (Pb)$  за бентичке рибе, ларве инсеката и зоопланктон, и  $CR (Pb)$  шкољке. Вриједности SRCC које одговарају овим параметрима имају и позитивне и негативне вриједности, све у зависности од организма. Врста и вриједност трећег параметра могу да зависе од врсте радионуклида (вријеме полураспада је величина која има важну улогу), расподеле радионуклида у води, седименту или биљкама, осјетљивости организма, брзине метаболизма организма, начина уноса радионуклида у организам, акумулације радионуклида у ланцима исхране, као и од врсте станишта организама. Водоземци имају танку кожу, која апсорбује воду заједно са радионуклидима који се налазе у тој води, па ако се радионуклид акумулише у воденој фази путем апсорпције може да доспије у организам водоземаца, а осим путем апсорпције радионуклиди у организам водоземаца могу доспјети уносом воде и хране (инсекти и рибе које су потенцијално контаминирани). Радионуклиди на сличан начин могу да доспију и у организме риба, уз напомену да за бентичке рибе, које живе на дну ријека и језера, потенцијални ризик представља акумулација радионуклида у седименту али и организмима који настањују дно, а који представљају дио ланца исхране бентичких риба. Зоопланктон се храни фитопланктоном, апсорбује воду, али и материје из седимента и на тај начин потенцијално долази до контаминације радионуклидима. Пужеви имају јако танку кожу па у контакту са водом или седиментом у којима су присутни радионуклиди долази до њихове апсорпције. Шкољке филтрирају воду, апсорбујући на тај начин радионуклиде који се потенцијално налазе у води, али, баш као и пужеви, у контакту са седиментом могу да апсорбују радионуклиде који су присутни у том седименту.

Процјена у оквиру ERICA програма обухвата и краткоживеће потомке који настају радиоактивним распадом радионуклида које смо одабрали као почетну тачку процјене, па процјена у овоме случају у обзир узима и радионуклиде  $^{218}\text{Po}$  и  $^{214}\text{Pb}$ .

Вриједност  $K_d$  ( $\text{Po}$ ) је за водоземце негативна, што значи да се овај радионуклид више акумулише у воденој фази (водоземци ефикасно елиминишу радионуклиде из организма), док је за птице позитивна, што значи да се  $^{218}\text{Po}$  више акумулише у седименту, па је допринос  $^{218}\text{Po}$  укупној дози већи за водоземце него за птице. Вриједност  $CR$  ( $\text{Po}$ ) код пелагичних риба износи 0.0339, што говори да концентрација  $^{218}\text{Po}$  у организмима пелагичних риба није знатно већа у односу на концентрацију  $^{218}\text{Po}$  у средини у којој се пелагичне рибе налазе, па ни његово акумулисање у ланцу исхране коме припадају пелагичне рибе неће бити значајно. Сличан закључак вриједи за рептиле. Вриједност  $CR$  ( $\text{Th}$ ) код пужева износи 0.02, што говори да је утицај  $^{232}\text{Th}$  на укупну дозу за пужеве, релативно низак у поређењу са утицајем  $^{226}\text{Ra}$ . Вриједност  $K_d$  ( $\text{Pb}$ ) за бентичке рибе износи 0.0115, дакле, ова вриједност је позитивна и говори да ће се  $^{214}\text{Pb}$  више везивати за седимент, што повећава вјероватноћу да ће доћи до његове акумулације у организмима бентичких риба, пошто је ово врста која настањује дно слатководних система, уједно се хранећи организмима који се налазе на дну, односно, у додиру са седиментом. Код ларви инсеката је вриједност  $K_d$  ( $\text{Pb}$ ) позитивна, што ће рећи да се  $^{214}\text{Pb}$  више акумулише у седименту, а пошто су ларве инсеката у директном контакту са седиментом, што је већа вриједност  $K_d$  ( $\text{Pb}$ ) то ће бити већа и доза коју примају ларве инсеката. Међутим, ово не представља ризик само за ларве инсеката већ и за организме који се хране овим ларвама (нпр. птице). Вриједност  $K_d$  ( $\text{Pb}$ ) код зоопланктона износи -0,031, што говори да се  $^{214}\text{Pb}$  више акумулише у води, што даје допринос укупној дози за зоопланктон, али представља ризик и за организме који се хране зоопланктоном (нпр. ракови и рибе). Вриједности  $CR$  ( $\text{Pb}$ ) за шкољке су позитивне и указују на то да  $^{214}\text{Pb}$  утиче на повећање укупне дозе за шкољке, што представља директан ризик за ланце исхране у слатководним екосистемима.

## ***6.2 Процјена ризика и тумачење добијених резултата у случају копненог екосистема***

Пошто одлагалиште фосфогипса за које се врши процјена радиолошког ризика подразумева слатководни и копнени екосистем, осим за референтне организме који договарају слатководном екосистему потребно је извршити и процјену ризика за све референтне организме које подразумева копнени екосистем. Процјена је првенствено вршена у оквиру другог ранга ( $T_2$ ), а подаци који представљају полазну тачку процјене су: радионуклиди  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ , копнени екосистем и одговарајући референтни организми (чланковити црви, зглавкари, птице, летећи инсекти, траве и зељасте биљке, лишајеви и маховине, крупни сисари, ситни сисари, пужеви, жбуње и дрвеће). За скрининг вриједност брзине дозе је одабрана вриједност од  $10 \mu\text{Gy h}^{-1}$ , а за вриједност фактора несигурности вриједност која одговара средњем нивоу повјерења,  $UF=3$ .

Пошто су вриједности коефицијента ризика, добијене процјеном у оквиру другог ранга ( $T_2$ ), за осам референтних организма (чланковити црви, зглавкари, летећи инсекти, траве и зељасте биљке, лишајеви и маховине, крупни сисари, ситни сисари и жбуње) биле веће од јединице, процјена је настављена у оквиру трећег ранга ( $T_3$ ).

Табела 10. Укупна брзина дозе по организму, очекивана и процијењена вриједност коефицијента ризика за концентрације активности појединачних узорака фосфогипса

| УЗОРАК    |                       | PG1                                                          |                           |                            | PG2                                                          |                           |                            |
|-----------|-----------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|
|           |                       | Total Dose<br>Rate per<br>organism<br>[ μGyh <sup>-1</sup> ] | RQ<br>(expected<br>value) | RQ<br>(estimated<br>value) | Total Dose<br>Rate per<br>organism<br>[ μGyh <sup>-1</sup> ] | RQ<br>(expected<br>value) | RQ<br>(estimated<br>value) |
| ОРГАНИЗАМ | Чланковити црви       | 14.40                                                        | 1.44                      | 4.32                       | 15.30                                                        | 1.53                      | 4.60                       |
|           | Зглавкари (детриворе) | 14.40                                                        | 1.44                      | 4.31                       | 15.30                                                        | 1.53                      | 4.60                       |
|           | Птице                 | 2.53                                                         | 0.25                      | 0.76                       | 2.69                                                         | 0.27                      | 0.81                       |
|           | Летећи инсекти        | 3.76                                                         | 0.38                      | 1.13                       | 4.00                                                         | 0.40                      | 1.20                       |
|           | Траве и зељасте биљке | 11.50                                                        | 1.15                      | 3.45                       | 12.20                                                        | 1.22                      | 3.67                       |
|           | Лишајеви и маховине   | 48.5                                                         | 4.85                      | 14.60                      | 51.70                                                        | 5.17                      | 15.5                       |
|           | Крупни сисари         | 6.22                                                         | 0.62                      | 1.87                       | 6.63                                                         | 0.66                      | 1.99                       |
|           | Ситни сисари          | 6.50                                                         | 0.65                      | 1.95                       | 6.92                                                         | 0.69                      | 2.08                       |
|           | Пужеви                | 2.01                                                         | 0.20                      | 0.60                       | 2.15                                                         | 0.22                      | 0.64                       |
|           | Жбуње                 | 22.90                                                        | 2.29                      | 6.88                       | 2.44                                                         | 2.44                      | 7.33                       |
|           | Дрвеће                | 1.26                                                         | 0.13                      | 0.38                       | 1.35                                                         | 0.14                      | 0.40                       |
|           | УЗОРАК                |                                                              | PG3                       |                            |                                                              | PG4                       |                            |
|           |                       | Total Dose<br>Rate per<br>organism<br>[ μGyh <sup>-1</sup> ] | RQ<br>(expected<br>value) | RQ<br>(estimated<br>value) | Total Dose<br>Rate per<br>organism<br>[ μGyh <sup>-1</sup> ] | RQ<br>(expected<br>value) | RQ<br>(estimated<br>value) |
| ОРГАНИЗАМ | Чланковити црви       | 21.70                                                        | 2.17                      | 6.52                       | 15.10                                                        | 1.51                      | 4.53                       |
|           | Зглавкари (детриворе) | 21.70                                                        | 2.17                      | 6.52                       | 15.10                                                        | 1.51                      | 4.53                       |
|           | Птице                 | 3.82                                                         | 0.38                      | 1.14                       | 2.65                                                         | 0.27                      | 0.80                       |
|           | Летећи инсекти        | 5.68                                                         | 0.57                      | 1.70                       | 3.94                                                         | 0.39                      | 1.18                       |
|           | Траве и зељасте биљке | 17.40                                                        | 1.74                      | 5.21                       | 12.10                                                        | 1.21                      | 3.62                       |
|           | Лишајеви и маховине   | 73.30                                                        | 7.33                      | 2.20                       | 50.90                                                        | 5.09                      | 1.53                       |
|           | Крупни сисари         | 9.40                                                         | 0.94                      | 2.82                       | 6.53                                                         | 0.65                      | 1.96                       |
|           | Ситни сисари          | 9.81                                                         | 0.98                      | 2.94                       | 6.82                                                         | 0.68                      | 2.04                       |
|           | Пужеви                | 3.04                                                         | 0.30                      | 0.91                       | 2.11                                                         | 0.21                      | 0.63                       |
|           | Жбуње                 | 34.60                                                        | 0.35                      | 10.4                       | 2.41                                                         | 2.41                      | 7.22                       |
|           | Дрвеће                | 1.91                                                         | 0.19                      | 0.57                       | 1.33                                                         | 0.13                      | 0.40                       |

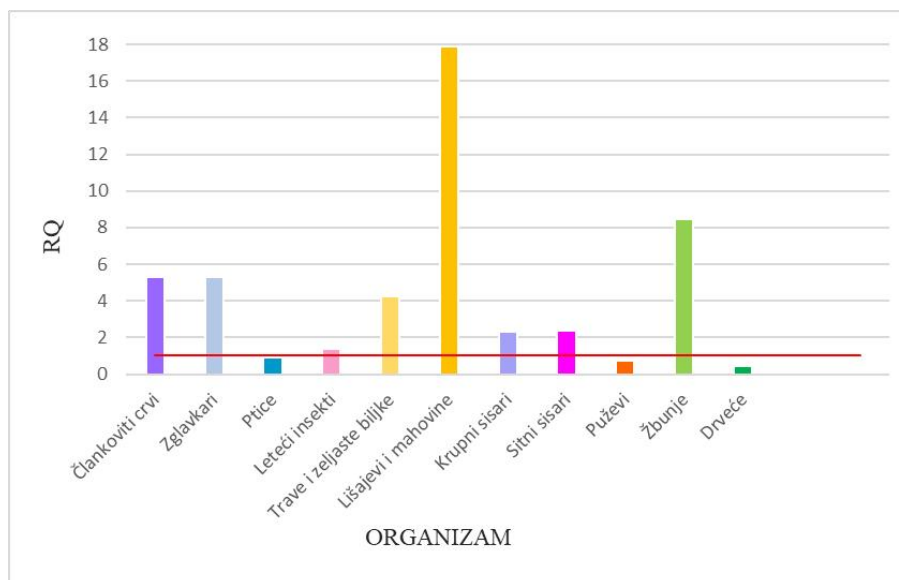


| УЗОРАК    |                       | PG5                                                   |                     |                      | PG6                                                   |                     |                      |
|-----------|-----------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|
| ОРГАНИЗАМ |                       | Total Dose Rate per organism [ $\mu\text{Gyh}^{-1}$ ] | RQ (expected value) | RQ (estimated value) | Total Dose Rate per organism [ $\mu\text{Gyh}^{-1}$ ] | RQ (expected value) | RQ (estimated value) |
|           | Чланковити црви       | 18.50                                                 | 1.85                | 5.54                 | 19.10                                                 | 1.91                | 5.74                 |
|           | Зглавкари (детриворе) | 18.40                                                 | 1.84                | 5.53                 | 19.10                                                 | 1.91                | 5.74                 |
|           | Птице                 | 3.24                                                  | 0.32                | 0.97                 | 3.36                                                  | 0.34                | 1.01                 |
|           | Летећи инсекти        | 4.82                                                  | 0.48                | 1.45                 | 5.00                                                  | 0.50                | 1.50                 |
|           | Траве и зељасте биљке | 14.70                                                 | 1.47                | 4.42                 | 15.30                                                 | 1.53                | 4.58                 |
|           | Лишајеви и маховине   | 62.30                                                 | 6.23                | 18.70                | 64.50                                                 | 6.45                | 19.40                |
|           | Крупни сисари         | 7.98                                                  | 0.80                | 2.39                 | 8.28                                                  | 0.83                | 2.48                 |
|           | Ситни сисари          | 8.33                                                  | 0.83                | 2.50                 | 8.64                                                  | 0.86                | 2.59                 |
|           | Пужеви                | 2.58                                                  | 0.26                | 7.75                 | 2.68                                                  | 0.27                | 0.80                 |
|           | Жбуње                 | 29.40                                                 | 2.94                | 8.82                 | 30.50                                                 | 3.05                | 9.14                 |
|           | Дрвеће                | 1.62                                                  | 0.16                | 0.49                 | 1.68                                                  | 0.17                | 0.50                 |
| УЗОРАК    |                       | PG7                                                   |                     |                      | PG8                                                   |                     |                      |
| ОРГАНИЗАМ |                       | Total Dose Rate per organism [ $\mu\text{Gyh}^{-1}$ ] | RQ (expected value) | RQ (estimated value) | Total Dose Rate per organism [ $\mu\text{Gyh}^{-1}$ ] | RQ (expected value) | RQ (estimated value) |
|           | Чланковити црви       | 18.00                                                 | 1.80                | 5.39                 | 19.30                                                 | 1.93                | 5.80                 |
|           | Зглавкари (детриворе) | 17.90                                                 | 1.79                | 5.38                 | 19.30                                                 | 1.93                | 5.80                 |
|           | Птице                 | 3.15                                                  | 0.31                | 0.95                 | 3.40                                                  | 0.34                | 1.02                 |
|           | Летећи инсекти        | 4.69                                                  | 0.50                | 1.41                 | 5.05                                                  | 0.51                | 1.52                 |
|           | Траве и зељасте биљке | 14.30                                                 | 1.43                | 4.30                 | 15.40                                                 | 1.54                | 4.63                 |
|           | Лишајеви и маховине   | 60.60                                                 | 6.06                | 18.20                | 65.20                                                 | 6.52                | 19.60                |
|           | Крупни сисари         | 7.77                                                  | 0.77                | 2.33                 | 8.37                                                  | 0.84                | 2.51                 |
|           | Ситни сисари          | 8.11                                                  | 0.81                | 2.43                 | 8.37                                                  | 0.88                | 2.62                 |
|           | Пужеви                | 2.51                                                  | 0.25                | 0.75                 | 2.71                                                  | 0.27                | 0.81                 |
|           | Жбуње                 | 28.60                                                 | 2.86                | 8.58                 | 30.80                                                 | 3.08                | 9.24                 |
|           | Дрвеће                | 1.58                                                  | 0.16                | 0.47                 | 1.70                                                  | 0.17                | 0.51                 |

Табела 11. Укупна брзина дозе по организму, очекивана и процијењена вриједност коефицијента ризика за средње вриједности концентрација активности радионуклида

| ОРГАНИЗАМ             | Total Dose        |                           | RQ (expected value) | RQ (estimated value) |
|-----------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|
|                       | Rate per organism | [ $\mu\text{Gy h}^{-1}$ ] |                     |                      |
| Чланковити црви       | 17.70             |                           | 1.77                | 5.31                 |
| Зглавкари (детриворе) | 17.70             |                           | 1.77                | 5.30                 |
| Птице                 | 3.11              |                           | 0.31                | 0.93                 |
| Летећи инсекти        | 4.62              |                           | 0.46                | 1.39                 |
| Траве и зељасте биљке | 14.10             |                           | 1.41                | 4.24                 |
| Лишајеви и маховине   | 59.70             |                           | 5.97                | 17.90                |
| Крупни сисари         | 7.65              |                           | 0.77                | 2.30                 |
| Ситни сисари          | 7.99              |                           | 0.80                | 2.40                 |
| Пужеви                | 2.48              |                           | 0.25                | 0.74                 |
| Жбуње                 | 2.82              |                           | 2.82                | 8.45                 |
| Дрвеће                | 1.55              |                           | 0.16                | 0.47                 |

Резултати добијени процјеном за копнени екосистем у оквиру другог ранга су приказани у табелама Табела 10. и Табела 11. У табели Табела 11. су приказане вриједности укупне брзине дозе по организму, као и очекиване и процијењене вриједности коефицијента ризика за средње вриједности концентрација активности изабраних радионуклида, за све референтне организме.

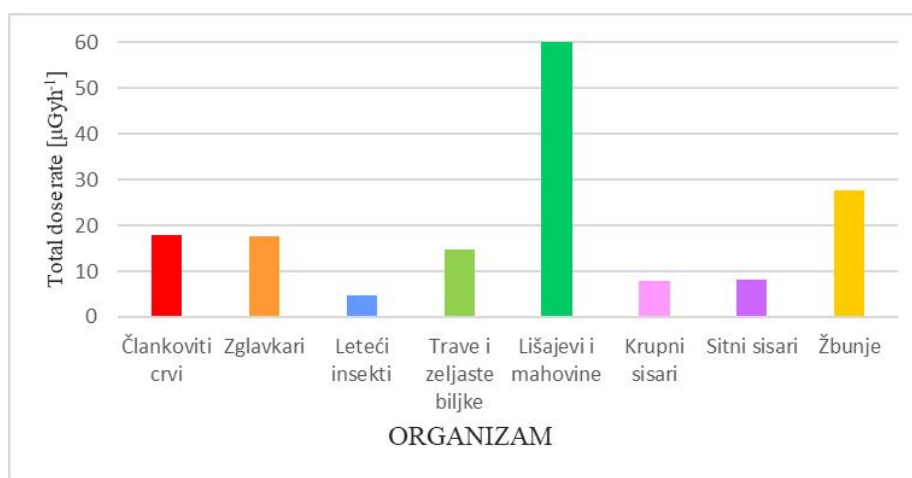


Слика 37. Коефицијент ризика за све референтне организме обухваћене процјеном у копненом екосистему

На основу табеле Табела 11. можемо уочити да су процијењене вриједности коефицијента ризика за све референтне организме веће од очекиваних вриједности, те да су процијењене вриједности коефицијента ризика за осам референтних организама

од укупних једанаест веће од јединице. Лишајеви и маховине представљају главне биоиндикаторе радиолошког загађења, а максимална процијењена вриједност коефицијента ризика за лишајеве и маховине износи 17.9, па можемо закључити да се процијењене вриједности ризика за референтне организме у копненом екосистему мање разликују од јединице у односу на процијењене вриједности коефицијента ризика за референтне организме у слатководном екосистему, гдје је максимална процијењена вриједност коефицијента ризика износила 155. Процијењене вриједности коефицијента ризика су за птице, пужеве и дрвеће мање од јединице, па за ове организме није потребно вршити процјену у оквиру трећег ранга ( $T_3$ ), док је за све остале организме потребно извршити анализу осјетљивости.

Дијаграм приказан на слици *Слика 38.* показује да је максимална процијењена вриједност укупне брзине дозе 59.9  $\mu\text{Gy h}^{-1}$ , и то за лишајеве и маховине, процијењена вриједност укупне брзине дозе за жбуње износи 27,6  $\mu\text{Gy h}^{-1}$ , док су процијењене вриједности укупне брзине дозе за остале референтне организме мање од 20  $\mu\text{Gy h}^{-1}$ . Поређењем дијаграма приказаних на сликама *Слика 27.* и *Слика 38.* можемо закључити да су вриједности укупне брзине дозе веће за референтне организме у слатководном екосистему него у копненом екосистему, што говори да радионуклиди за које се врши процјена ризика представљају већи потенцијални ризик за организме у слатководним екосистемима. Организми који настањују слатководне екосистеме чине дијелове ланаца исхране других организама, али и људи, па акумулација поменутих радионуклида у референтним организмима не представља опасност само за организме, већ и за људе. Овај закључак указује на то колико је анализа ризика важан сегмент заштите екосистема, као и људи.



*Слика 38. Укупна брзина дозе за све референтне организме обухваћене процјеном у копненом екосистему*

Параметри који су од највећег значаја за укупну брзину дозе су у случају одабраних референтних организама и радионуклида у копненом екосистему:

- Однос концентрација радијума CR [Ra]
- Други и трећи параметар за све организме је, такође, однос концентрација CR, с тим да се у зависности од референтног организма ради о различитим радионуклидима (Th, Po, Pb или Bi)

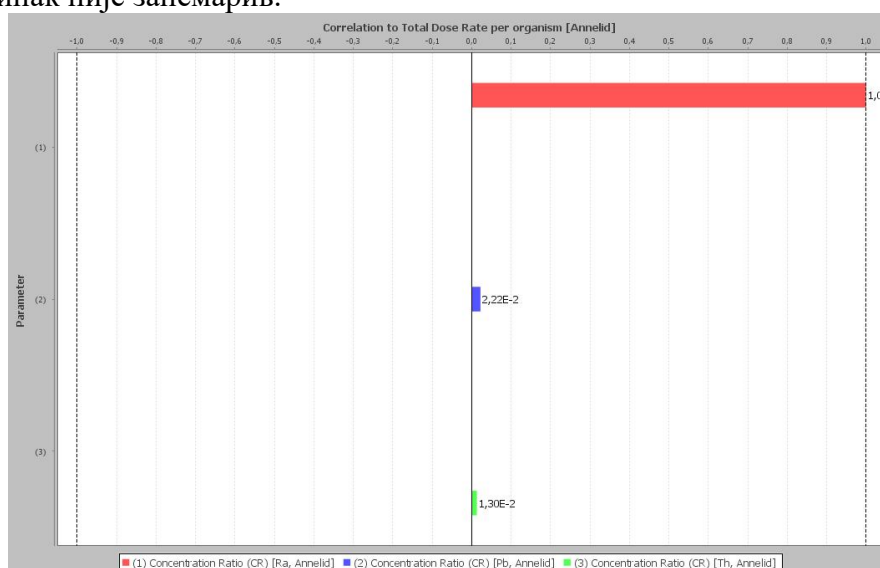
Торнадо дијаграми приказани на сликама, од *Слика 39.* до *Слика 46.*, показују да односу концентрација радијума, за све референтне организме, одговарају позитивне вриједности SRCC коефицијената, баш као и у случају референтних организама у слатководном екосистему, с тим да су у случају референтних организама копненог система све вриједности SRCC коефицијената једнаке јединици, што говори да је веза између односа концентрација радијума и укупне брзине дозе позитивна и јака. Добијени резултати указују на то да највећи допринос укупној брзини дозе даје управо  $^{226}\text{Ra}$ , па је могуће закључити да се радијум акумулише у организмима, што говори да што је већа вриједност односа концентрација радионуклида, то је већа и укупна доза коју организам прими.

Што се тиче другог параметра, у зависности од врсте референтног организма уочавамо да се ради о следећим параметрима: CR (Th) за летеће инсекте, лишајеве и маховине и крупне сисаре, CR (Pb) за чланковите црве, зглавкаре, ситне сисаре и жбуње, као и CR (Bi) за траве и зељасте биљке. Вриједности SRCC коефицијената, које одговарају различитим односима концентрација се налазе у опсегу од 0.00673, за траве и зељасте биљке, па до 0.0313, за летеће инсекте. Овакви резултати указују да је допринос  $^{226}\text{Ra}$  укупној брзини дозе знатно већи у односу на допринос који дају остали радионуклиди ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  или  $^{214}\text{Bi}$ ).

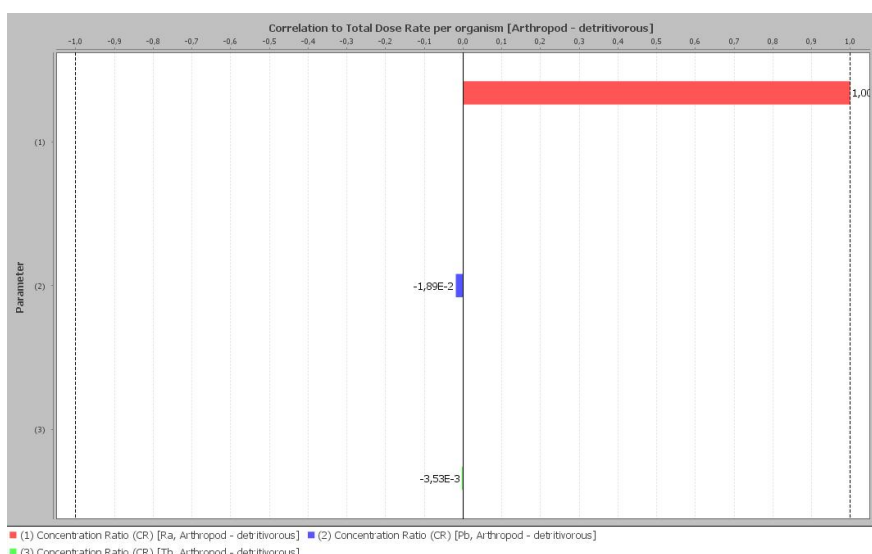
Трећи параметар представља: CR (Th) за зглавкаре, чланковите црве, траве и зељасте биљке, ситне сисаре и жбуње, CR (Po) за летеће инсекте и лишајеве и маховине, као и CR (Bi) за крупне сисаре. Вриједности SRCC које одговарају овим параметрима имају и позитивне и негативне вриједности, све у зависности од организма. Вриједности SRCC коефицијената, које одговарају различитим односима концентрација се налазе у опсегу од 0.00943, за летеће инсекте, па до 0.022, за лишајеве и маховине, а као и у случају другог параметра, допринос укупној брзини дозе  $^{226}\text{Ra}$  је и даље доминантан у односу на остале радионуклиде.

Процјена у случају копнених екосистема, дакле, обухвата и краткоживеће потомке  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$ , који настају радиоактивним распадом  $^{226}\text{Ra}$ .

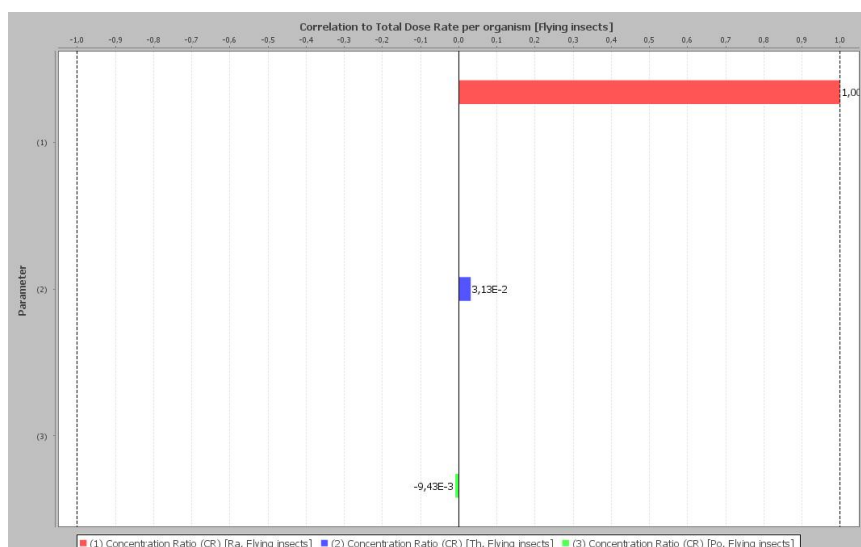
Вриједности SRCC, које су позитивне а које одговарају односима концентрација CR говоре да долази до акумулације одговарајућих радионуклида у референтним организмима, док негативне вриједности SRCC које одговарају односима концентрација CR, говоре да не долази до акумулације одговарајућих радионуклида у референтним организмима, али да допринос ових радионуклида укупној дози за организме ипак није занемарив.



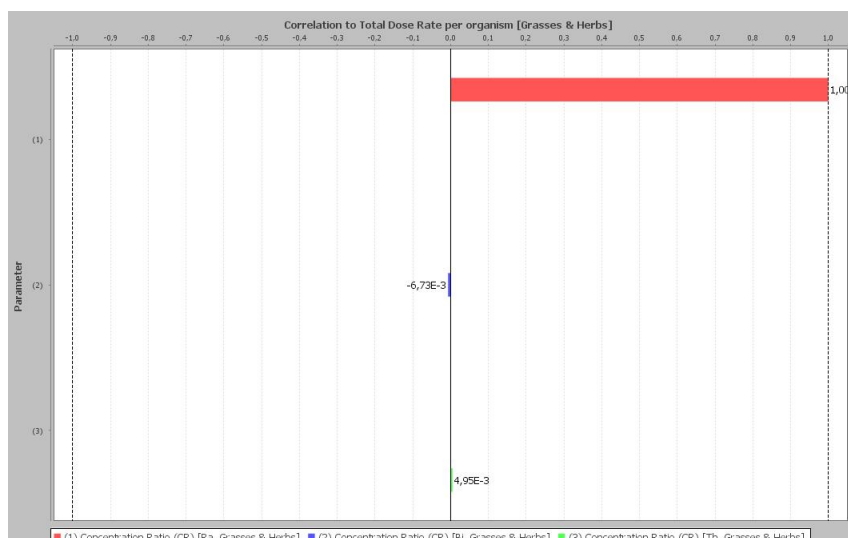
*Слика 39. Торнадо дијаграм- чланковити црви*



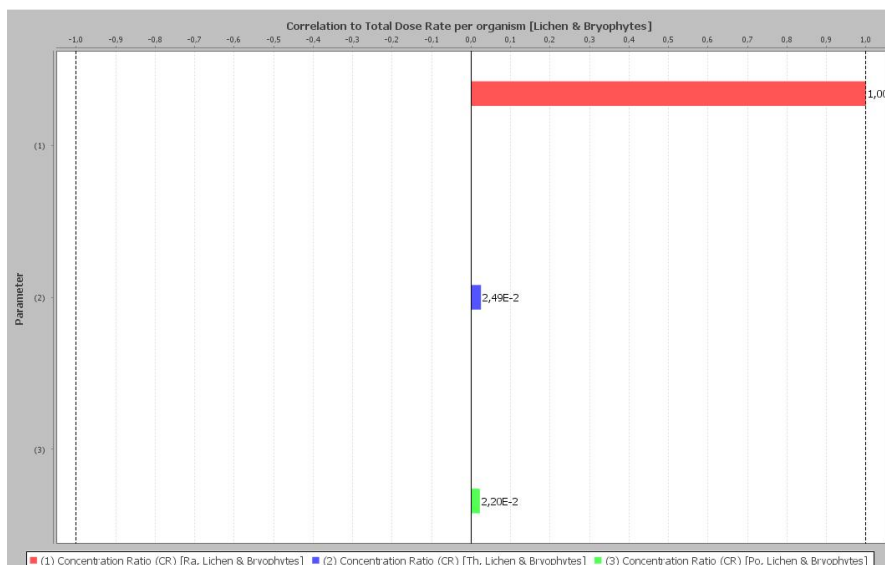
Слика 40. Торнадо дијаграм- зглавкари



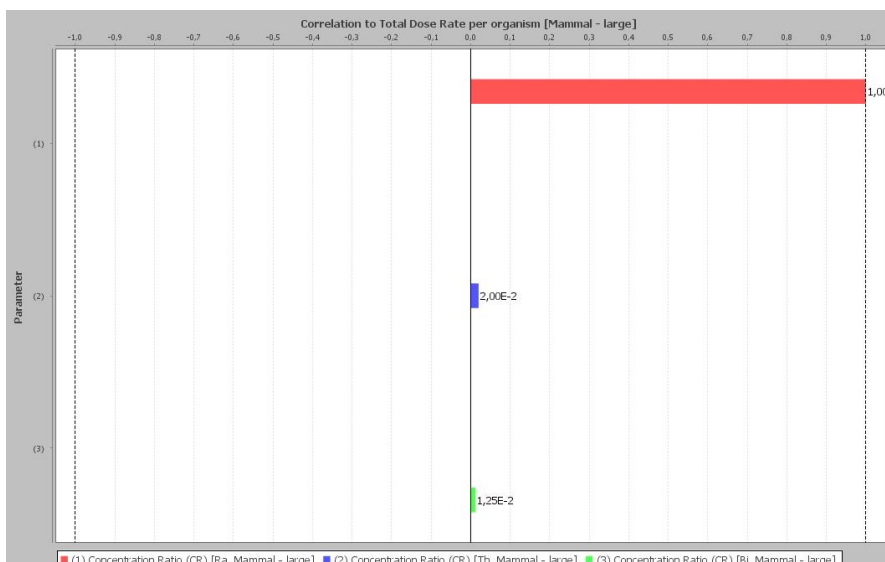
Слика 41. Торнадо дијаграм- летећи инсекти



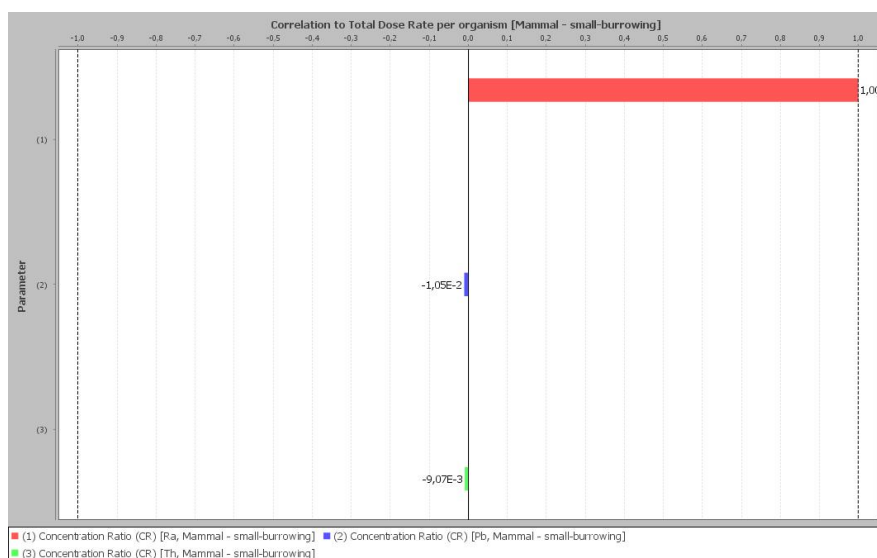
Слика 42. Торнадо дијаграм- траве и зељасте биљке



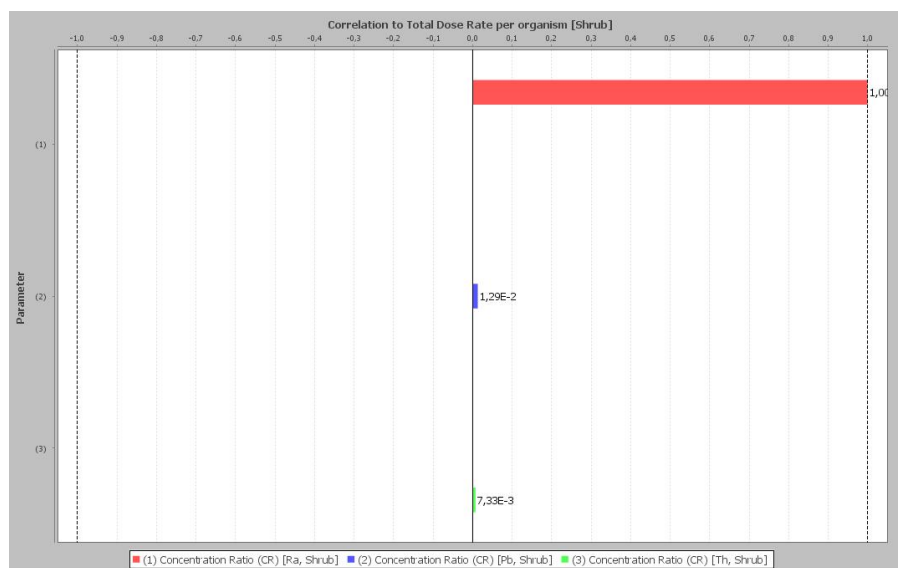
Слика 43. Торнадо дијаграм- лишајеви и маховине



Слика 44. Торнадо дијаграм- крупни сисари



Слика 45. Торнадо дијаграм- ситни сисари



Слика 46. Торнадо дијаграм- жбуње

## 7. Закључак

Резултати процјене ризика показују да су процијењене вриједности коефицијента ризика за одређене биљне и животињске врсте, које настањују слатководни и копнени екосистем Дунава, карактеристичне за одлагалиште фосфогипса у околини Прахова, веће од јединице, што указује на то да постоји потенцијални ризик за дате биљне и животињске врсте.

Резултати добијени процјеном за референтне организме слатководног и копненог екосистема Дунава, карактеристичне за одлагалиште фосфогипса у околини Прахова, су упоређени са резултатима процјене за исте организме одговарајућих екосистема парка природе "Копачки рит".

Парк природе "Копачки рит", се налази у околини Осијека, у непосредној близини ушћа ријеке Драве у Дунав а припада Средњем сливу Дунава. Овај природни резерват се налази низводно од нуклеарне електране Пакс у Мађарској, али и у близини регија за које је карактеристична интензивна пољопривредна производња. Вриједности добијене процјеном су, у овом случају, показале да не постоји радиолошки ризик када су у питању референтни организми карактеристични за слатководни екосистем, док за одређене референтне организме карактеристичне за копнени екосистем постоји потенцијални ризик, који потиче углавном од  $^{226}\text{Ra}$ . [Petrinec et al., 2018]

У сврху поређења су кориштене процијењене вриједности укупне брзине дозе и коефицијента ризика приказане у раду "Assessing the radiological load on the environment in the middle Danube river basin on the basis of a study of the Kopački Rit Nature Park, Croatia", чији су аутори Б. Петринец, М. Поје Совиљ, Д. Бабић, Т. Мештровић, И. Миклавчић, В. Радолић, . Станић, Б. Вуковић и М. Шоштарих. [Petrinec et al., 2018]

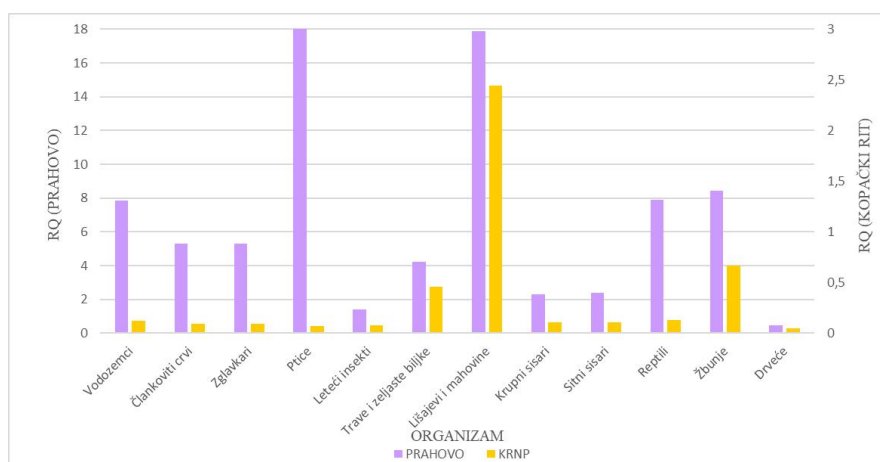
Табела 12. Вриједности укупне брзине дозе и коефицијента ризика за одабране референтне организме слатководног и копненог екосистема добијене процјенама за одлагалиште фосфогипса у Прахову и парк природе "Копачки рит"

|           |                          | Одлагалиште фосфогипса<br>у близини Прахова     |                            | Парк природе Копачки<br>рит                     |                            |
|-----------|--------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|
|           |                          | Total Dose<br>Rate<br>[ $\mu\text{Gy h}^{-1}$ ] | RQ<br>(estimated<br>value) | Total Dose<br>Rate<br>[ $\mu\text{Gy h}^{-1}$ ] | RQ<br>(estimated<br>value) |
| ОРГАНИЗАМ | Водоземци                | 26.1                                            | 7.84                       | 0.40                                            | 0.12                       |
|           | Чланковити црви          | 17.7                                            | 5.31                       | 0.31                                            | 0.09                       |
|           | Зглавкари                | 17.7                                            | 5.30                       | 0.29                                            | 0.09                       |
|           | Птице                    | 62.3                                            | 18.7                       | 0.23                                            | 0.07                       |
|           | Летећи инсекти           | 4.62                                            | 1.39                       | 0.27                                            | 0.08                       |
|           | Траве и зељасте<br>биљке | 14.1                                            | 4.24                       | 1.53                                            | 0.46                       |
|           | Лишајеви и<br>маховине   | 59.7                                            | 17.9                       | 8.12                                            | 2.44                       |
|           | Крупни сисари            | 7.65                                            | 2.3                        | 0.37                                            | 0.11                       |
|           | Ситни сисари             | 7.99                                            | 2.4                        | 0.38                                            | 0.11                       |
|           | Рептили                  | 26.4                                            | 7.92                       | 0.43                                            | 0.13                       |
|           | Жбуње                    | 2.82                                            | 8.45                       | 2.24                                            | 0.67                       |
|           | Дрвеће                   | 1.55                                            | 0.46                       | 0.17                                            | 0.05                       |

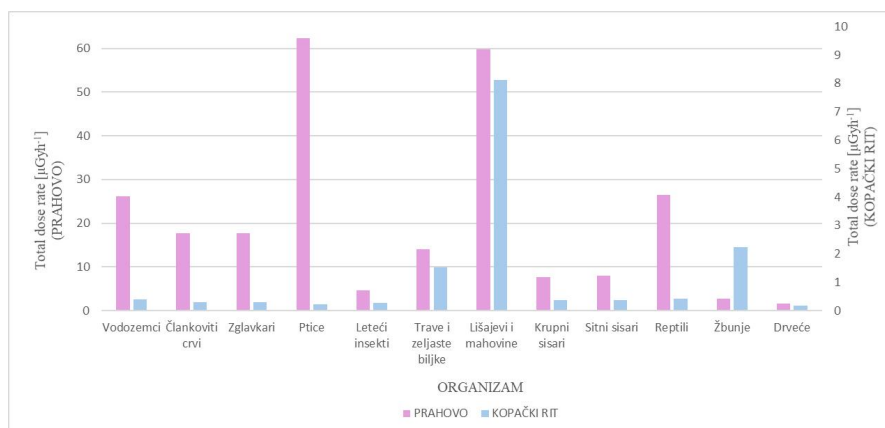


Поређење процијењених вриједности укупне брзине дозе и коефицијента ризика је извршено за следеће биљне и животињске врсте: водоземци, чланковити црви, зглавкари, птице, летећи инсекти, траве и зељасте биљке, лишајеви и маховине, крупни сисари, ситни сисари, рептили, жбуње и дрвеће.

На основу резултата приказаних у табели *Табела 12.* можемо уочити да су процијењене вриједности укупне брзине дозе и коефицијента ризика за све референтне организме за одлагалиште фосфогипса у околини Прахова веће у односу на процијењене вриједности за парк природе Копачки рит. Када су у питању биљне врсте, у случају лишајева и маховина, обје процјене дају вриједност коефицијента ризика која је већа од јединице, при чему је процијењена вриједност коефицијента ризика у случају одлагалишта фосфогипса 17.9, док је ова вриједност у случају парка природе 2.44. Када су у питању животињске врсте, највећа разлика процијењених вриједности коефицијента ризика се уочава код птица. У оба случаја доминантан допринос потенцијалном ризику даје <sup>226</sup>Ra.



Слика 32. Поређење процијењених вриједности коефицијента ризика добијених процјеном за референтне организме карактеристичне за одлагалиште фосфогипса у близини Прахова и парк природе "Копачки рит"



Слика 33. Поређење процијењених вриједности укупне брзине дозе добијених процјеном за одлагалиште фосфогипса у близини Прахова и парк природе "Копачки рит"

Поређењем резултата које су дале поменуте процјене можемо закључити да у случају процјене вршене за одлагалиште фосфогипса у околини Прахова постоји потенцијални

радиолошки ризик за одабране референтне организме слатководног али и копненог екосистема, док резултати процјене вршене за парк природе "Копачки рит" указују на то да постоји потенцијални ризик само за одабране референтне организме карактеристичне за копнени екосистем.

Процјена вршена за одлагалиште фосфогипса у околини Прахова показује да максимална процијењена вриједност коефицијента ризика у случају слатководних екосистема износи 155, и то за ларве инсеката, шкољке и пужева, док код копненог екосистема говоримо о вриједности од 17.9, и то за лишајеве и маховине. Вриједности концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$ , које су кориштене као једна од почетних тачака процјене, су чак дванаест пута веће од дозвољених вриједности концентрација активности за грађевинске материјале у свијету, док су концентрације активности  $^{232}\text{Th}$  унутар дозвољених граничних вриједности, па  $^{226}\text{Ra}$  даје доминантан допринос укупној брзини дозе, али и ризику, за све референтне организме. Процијењене вриједности коефицијента ризика, које су много веће од јединице, је дјелимично могуће објаснити осјетљивошћу организама, чињеницом да програм приликом процјене користи конзервативне претпоставке (низ претпоставки које у обзир узимају најнеповољнији сценарио, све како не би дошло до потцјене потенцијалних опасности), као и тиме да програм у недостатку специфичних (локалних) података користи генеричке вриједности односа концентрација ( $CR$ ) и фактора заузећа (*occupancy factors*), које за резултат могу имати прецјену изложености.

Овакви резултати процјене указују на то да је потребна даља анализа, прикупљање специфичних података, као и предузимање одговарајућих мјера заштите најугроженијих организама.

## 8. *Литература:*

- A. Hosseini, H. Thørring, J.E. Brown, R. Saxén, E. Ilus, (2008.), Transfer of radionuclides in aquatic ecosystems - Default concentration ratios for aquatic biota in the ERICA tool, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 1408-1429.
- A. Ulanovsky, G. Pröhl, J.M. Gómez-Ros, (2008.), Methods for calculating dose conversion coefficients for terrestrial and aquatic biota, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 1440-1448.
- Ahmad, Nur, Pramudya Dwi, Pramudya Dwi Aristya Putra, Sutarto, Indrawati, and I. Mahardika, 2022., Student Learning Perception toward Inbound and Outbound Student Exchange Mobility in Science Education, *JURNAL PENDIDIKAN MIPA*, vol. 23, 2022, pp. 740–750. <https://doi.org/10.23960/jpmipa/v23i2.pp740-750>.
- B. Petrinc, M. Poje Sovilj, D. Babić, T. Meštrović, I. Miklavčić, V. Radolić, D. Stanić, B. Vuković, M. Šoštarić, (2018.), Assessing the radiological load on the environment in the middle Danube river basin on the basis of a study of the Kopački Rit Nature Park, Croatia, *Radiation and Environmental Biophysics* 57:285-292
- Brenda J. Howard, Carl-Magnus Larsson, (2008.), The ERICA Integrated Approach and its contribution to protection of the environment from ionising radiation, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 1361-1363.
- C.-M. Larsson, (2008.), An overview of the ERICA Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising contaminants, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 1364-70.
- Carl-Magnus Larsson, (2008), An overview of the ERICA Integrated Approach to the assesment and management of environmental risks from ionising contaminants, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 1364-1370.
- Contemporary Physics Education Project (CPEP). (2018). Nuclear Science—A Guide to the Nuclear Science Wall Chart.
- E. J. Hall and A.J. Giaccia, 1998., *Radiation Biophysics (Second Edition)* Academic Press, Pages 78-103.
- EPFL Doctoral Course PY-031, "Radiation and Radioscopic Applications", Lecture 09 "Biological Effects of Radiation" by Rafael Macian, presented on November 23, 2006.
- FASSET Coordination Network, (2003.), Framework for Assessment of Environmental Impact, Table 7: FASSET geometries used in DCC derivations, FASSET Deliverable 5, Annex B.
- G. Gilmore, (2008.), *Practical Gamma-ray Spectrometry*, John Wiley & Sons
- G. Zheng, J. Xia, Z. Chen, (2020.), Overview of Current Phosphoric Acid Production Processes and a New Idea of Kiln Method, *Mini-Reviews in Organic Chemistry*
- I. Yinger, D. Oughton, (2007.), Summary of all ERICA EUG events, EC project contract no. FI6R-CT-2004-508847, <https://cordis.europa.eu/projects>
- IAEA (1993.), The Annual Report for 1992, *International Atomic Energy Agency in Austria*
- IAEA TRS 295 (1989.), Measurement of Radionuclides in Food and the Environment, *International Atomic Energy Agency*
- International Atomic Energy Agency (IAEA), (n.d.), Assessment of Occupational Exposure due to External Radiation Sources: Dosimetric Quantities and Units (Preuzeto sa: [https://nucleus.iaea.org/sites/orpnet/training/ExternalRadiation/Shared%20Documents/2\\_quantities%20-%20final.pdf](https://nucleus.iaea.org/sites/orpnet/training/ExternalRadiation/Shared%20Documents/2_quantities%20-%20final.pdf))
- International Atomic Energy Agency, (2007.), Naturally Occurring Radioactive Material (NORM V): Proceedings of an international symposium, Seville, Spain, 19–22 March 2007., *Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency*.

- Ivica Prlić, Ana Mostečak, Marija Surić Mihić, Želimir Veinović, Luka Pavelić (2017.), Radiological risk assesment: an overview of the ERICA Integrated Approach and the ERICA Tool use, *Institute for Medical Research and Ocupational Health, Faculty of Mining, Geology, and Petroleum Engineering- University of Zagreb*
- J.E. Brown, B. Alfonso, R. Avilla, N.A. Beresford, D. Copplestone, G. Pröhl, A. Ulanovsky (2008.), The ERICA Tool, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 1371-1383.
- J.E. Brown, N.A. Beresford, A. Hosseini, (2012.), Aproaches to providing missing transfer parameter values in the ERICA Tool - How well do they work?, *Journal of Environmental Radioactivity*, 126, 399-411.
- J.I. Išek, L.M. Kaluđerović, N.S. Vuković, M. Milošević, I. Vukašinović, Z.P. Tomić, (2020.), Refinement of waste phosphogypsum from Prahovo, Serbia: characterization and assessment of application in civil engineering *Clay Minerals*, 55(1):63-70. doi:10.1180/clm.2020.11.
- L. A. Currie, (1968). Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination, *Analytical Chemistry*, 40(3), 586–593.
- M. Silari, 2012., Quantities and units in radiation dosimetry (Presentation), 1st Annual ARDENT Workshop, Vienna, 20-23. November 2012., [https://indico.cern.ch/event/205479/contributions/398991/attachments/313311/437320/ARDENT\\_Vienna\\_lecture.pdf](https://indico.cern.ch/event/205479/contributions/398991/attachments/313311/437320/ARDENT_Vienna_lecture.pdf)
- N. Beresford, J. Brown, D. Copplestone, J. Garnier-Laplace, B. Howard, C.-M. Larsson, D. Oughton, G. Prohl, & I. Zinger (Eds.) (2004.), An INTEGRATED APPROACH to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation (Contract Number: FI6R-CT-2004-508847).
- N.A Beresford, C.I. Barnett, B.J. Howard, W.A. Scott, J.E. Brown, D. Copplestone (2008.), Derivation of transfer parameters for use within the Erica Tool and the default concentration ratios for terrestrial biota, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 1393-1407.
- National Research Council (US) Committee on Evaluation of EPA Guidelines for Exposure to Naturally Occurring Radioactive Materials, Evaluation of Guidelines for Exposures to Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials, Washington (DC): National Academies Press (US) 1999. 2, Natural Radioactivity and Radiation. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK230654/>
- Official Gazette 36/18, 2018.
- P. Kuzmanović, N. Todorović, S. Forkapić, L. F. Petrović, J. Knežević, J. Nikolov, B. Miljević, (2020.), Radiological characterization of phospogypsum produced in Serbia, *Radiation Physics and Chemistry* 166
- P. Kuzmanović, (2020.), Korelacija radioloških i strukturnih karakteristika građevinskih materijala (Doktorska disertacija), *Univerzitet u Novom Sadu*
- P. Radvanyi, (1996.), The Discovery of Radioactivity. *Europhysics News*, 27.
- P. Y. Gillot, A. Hildenbrand, J.C. Lefevre and C. Livadie, 2006., The K/Ar dating method : principle, analytical techniques, and application to Holocene volcanic eruptions in Southern Italy, *Acta Vulcanologica*, 18, 55-66.
- Rezgui, Rachid. "NucS Activity Studies at the Single Molecule Level." 2013.
- S. Manabe, H. Tenzou, T. Kasuga, Y. Iwakura, R. Johnston., 2017., An Augmented  $\gamma$ -Spray System to Visualize Biological Effects for Human Body, *EPJ Web of Conferences*, 153, 06020
- T. Bituh, B. Petrinc, B. Skoko, D. Babić, D. Rašeta, (2021.), Phosphogypsum and its potential use in Croatia: challenges and opportunities, *Institute for Medical Research an Occupational Health, Zagreb*

- T. Henriksen and D. H. Maillie, 2002., Radiation and Health (1st ed.), CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9780203166352>
- UNSCEAR (1996.), Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, *UNSCEAR*
- Y. Chernysh, O. Yakhanenko, V. Chubur, H. Roubik, (2021.), Phospogypsum Recycling: A Review of Environmental Issues, Current Trends, and Prospects, *Applied Sciences* 11, no. 4: 1575. <https://doi.org/10.3390/app11041575>
- Zavod za zaštitu prirode Srbije, (2020.), Izveštaj o strateškoj proceni uticaja na životnu sredinu IDPDR-a za kompleks hemijske industrije u Prahovu, *Zavod za zaštitu prirode Srbije*

Николина Тодоровић је рођена 26.9.1996. године у Требињу. Основну школу и гимназију завршава у Гацку, затим наставља школовање на Природно-математичком факултету, одсјек физика, у Бања Луци, након чега уписује мастер студије на Природно-математичком факултету, смјер медицинска физика, у Новом Саду.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

*Редни број:*

**РБР**

*Идентификациони број:*

**ИБР**

*Тип документације:*

Монографска документација

**ТД**

*Тип зашиса:*

Текстуални штампани материјал

**ТЗ**

*Врста рада:*

Мастер рад

**ВР**

*Аутор:*

Николина Тодоровић

**АУ**

*Ментор:*

Проф. Др Наташа Тодоровић, доц. др сц. Марина Поје  
Совиљ

**МН**

*Наслов рада:*

Процјена радиолошког ризика у близини одлагалишта  
фосфогипса помоћу ERICA програма

**НР**

*Језик публикације:*

српски (ћирилица)

**ЈП**

*Језик извода:*

српски

**ЈИ**

*Земља публикавања:*

Србија

**ЗП**

*Уже географско подручје:*

Војводина

**УГП**

*Година:*

2024.

**ГО**

*Издавач:*

Ауторски репринт

**ИЗ**

*Место и адреса:*

Природно-математички факултет, Трг Доситеја  
Обрадовића 4, Нови Сад

**МА**

*Физички опис рада:*

8 поглавља/67 страна/120 цитата/11 табела/20 слика/13  
графика

**ФО**

*Научна област:*

Физика

**НО**

*Научна дисциплина:*

Медицинска физика

**НД**

*Предметна одредница/кључне  
речи:*

ERICA програм, процјена радиолошког ризика, фосфогипс

**ПО**

**УДК**

*Чува се:*

Библиотека Департмана за физику, ПМФ-а у Новом Саду

**ЧУ**

*Важна напомена:*

нема

**ВН**

*Извод:*

**ИЗ**

Овај рад се бави процјеном радиолошког ризика за референтне организме слатководног и копненог екосистема Дунава, карактеристичне за одлагалиште фосфогипса у околини Прахова. Приликом процјене ризика је кориштен програм *ERICA (Environmental Risk from Ionizing Contaminants: Assessment and Management)*, верзија *ERICA 2.0*. Програм представља софтверски систем, чија се структура базира на истоименом интегрисаном приступу процјене радиобиолошког ризика за биодиверзитет, а служи за навођење корисника кроз процес процјене, као и за документовање информација и донесених одлука. У раду су приказани резултати процјене, односно, процијењене вриједности коефицијената ризика и укупне брзине дозе за све референтне организме, на основу којих је могуће закључити да за одређене организме постоји потенцијални ризик, потреба за даљим испитивањима и евентуално доношење потребних мјера заштите.

*Датум прихватања теме од  
НН већа:*

11.6.2024.

**ДП**

*Датум одбране:*

20.9.2024.

**ДО**

*Чланови комисије:*

Проф. др Наташа Тодоровић, доц. др Марина Поје Совиљ,  
проф. др Јована Николов, проф. др Ивана Стојковић

**КО**

*Председник:*

Проф. др Јована Николов

*Члан:*

Проф. др Ивана Стојковић

*Члан, ментор:*

Проф. др Наташа Тодоровић, доц. др Марина Поје Совиљ



UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

*Accession number:*

**ANO**

*Identification number:*

**INO**

*Document type:*

Monograph publication

**DT**

*Type of record:*

Textual printed material

**TR**

*Content code:*

Final paper

**CC**

*Author:*

Nikolina Todorović

**AU**

*Mentor/comentor:*

Professor, Ph.D. Nataša Todorović, Associate Professor, Ph.D.  
Marina Poje Sovilj

**MN**

*Title:*

Environmental radiological risk assesment of phosphogypsum  
disposal site with the use of the ERICA tool

**TI**

*Language of text:*

Serbian (Cyrilic)

**LT**

*Language of abstract:*

Serbian

**LA**

*Country of publication:*

Serbia

**CP**

*Locality of publication:*

Vojvodina

**LP**

*Publication year:*

2024

**PY**

*Publisher:*

Author's reprint

**PU**

*Publication place:*

Faculty of Science, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

**PP**

*Physical description:*

8 chapters/67 pages/120 cites/11 tables/20 pictures/13 graphs

**PD**

*Scientific field:*

Physics

**SF**

*Scientific discipline:*

Medical physics

**SD**

*Subject/ Key words:*

ERICA tool, radiological risk assesment, phosphogypsum

**SKW**

**UC**

*Holding data:*

Library of Department of Matematics and and Informatics, Trg  
Dositeja Obradovića 4

**HD**

*Note:*

none

**N**

*Abstract:*

This paper describes the process of the assessment of  
radiological risk for reference organisms of the freshwater and

**AB**

terrestrial ecosystem of the Danube, which correspond to phosphogypsum disposal site in the vicinity of Prahovo. The ERICA (Environmental Risk from Ionizing Contaminants: Assessment and Management) program, version 2.0, was used for the risk assessment. The program represents a software system, whose structure is based on the integrated approach of the same name for the assessment of radiobiological risk to biodiversity, and serves to guide the user through the assessment process, as well as to document information and decisions made. The paper presents the results of the assessment, i.e. the estimated values of the risk coefficients and the total dose rates for all reference organisms, based on which it is possible to conclude that there is a potential risk for certain organisms, a need for further research, and possibly the adoption of necessary protective measures.

*Accepted by the Scientific Board:*

**ASB**

*Defended on:*

**DE**

*Thesis defend board:*

**DB**

*President:*

*Member:*

*Member, mentor:*

11.6.2024.

20.9.2024.

Professor, Ph.D. Nataša Todorović, Associate Professor, Ph.D. Marina Poje Sovilj, Professor, Ph.D, Jovana Nikolov, Professor, Ph.D. Ivana Stojković  
Ph.D, Jovana Nikolov  
Professor, Ph.D. Ivana Stojković  
Professor, Ph.D. Nataša Todorović, Associate Professor, Ph.D. Marina Poje Sovilj