

Daugiakriterinės analizės metodo taikymas parenkant Ignalinos AE V1 pastato įrengimų išmontavimo būdą

2. Daugiakriterinės analizės metodika ir jos taikymo rezultatai

Gintautas Poškas,

Povilas Poškas,

Arūnas Sirvydas,

Audrius Šimonis

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinės inžinerijos
problemų laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas
El. paštas: g.poskas@gmail.com*

Antrajame šios straipsnių serijos darbe, apžvelgus ir palyginus daugiakriterinių sprendimų analizės metodus, parinkti du metodai: AHP ir FUZZY. Šių metodų pagrindu sudaryta pirmajame šios serijos straipsnyje nagrinėtos problemos sprendimo metodika.

Ekspertų vertinimai ir skaičiavimų rezultatai rodo, kad apšvitos dozė darbuotojams, projekto išlaidos ir neradioaktyviųjų (įskaitant ir dezaktyvuotų) atliekų masė yra svarbiausi kriterijai vertinant išmontavimo ir dezaktyvavimo būdus. Vertinimai abiem metodais parodė, kad I išmontavimo ir dezaktyvavimo būdas (kai atliekama radioaktyviųjų komponentų dezaktyvacija) yra geresnis už II būdą (kai neatliekama radioaktyviųjų komponentų dezaktyvacija). Todėl būtų tikslinga I būdą parinkti kaip tinkamiausią Ignalinos AE pastato V1 nebenaudojamos įrangos, kai susidaro nedegios, trumpaamžės labai mažai radioaktyvios ir mažai / vidutiniškai radioaktyvios atliekos, išmontavimui.

Raktažodžiai: Ignalinos AE V1 pastatas, įrangos išmontavimo būdai, daugiakriterinių sprendimų analizės metodų taikymas

IVADAS

Kaip jau buvo minėta pirmajame šios serijos straipsnyje [1], Ignalinos atominė elektrinė (IAE) 2009 m. gruodžio 31 d. visiškai sustabdė elektros energijos gamybą, ir eksploatacijos nutraukimo procesas tapo pagrindine IAE veikla. IAE eksploataavimo nutraukimo procesas apima ir 1-ojo bei 2-ojo RBMK-1500 reaktorių blokų ir jų pagalbinių pastatų nebenaudojamos įrangos išmontavimą ir dezaktyvavimą (I & D). Kad būtų pasirinktas tinkamiausias I & D būdas, reikia daugeliui vertinimo kriterijų (saugumo, ekonominių, efektyvumo, trukmės, atliekų minimizavimo ir kt.) atlikti įvairių I & D būdų analizę. Analizuojant ir vertinant tinkamiausią I & D būdą, aktualu parinkti tinkamą matematinį metodą, kurio pagalba būtų galima atlikti išsamią ir įvairiapusę analizę bei daugiakriterinį variantų palyginimą. Kai

nagrinėjamos problemos alternatyvos apibūdinamos keletu kriterijų, reikia taikyti vertinimo metodą, įgalinantį atsižvelgti į jų visumą. Šioms problemoms spręsti gerai tinka daugiakriterinių sprendimų analizės metodai.

Pirmajame šios serijos straipsnyje buvo surinkti ir apdoroti IAE RBMK-1500 1-ojo reaktoriaus bloko pagalbinių sistemų pastato (V1) įrangos komponentų pirminiai duomenys, suformuluoti alternatyvūs įrenginių išmontavimo būdai, sudarytas daugiakriterinei analizei atlikti reikalingas hierarchinis kriterijų sąrašas, kuris yra charakteringas atominių elektrinių užterštos įrangos išmontavimo projektams, pateiktas įrengimų skirtingų išmontavimo būdų kiekybinių kriterijų įvertinimas. Buvo analizuoti du įrengimų išmontavimo būdai (alternatyvos) – pirmasis, kai atliekama išmontuotų komponentų dezaktyvacija (kur tai įmanoma) ir antrasis, kai išmontuotų komponentų dezaktyvacija

neatliekama, o po išmontavimo jie iškart vežami į atitinkamas atliekų saugojimo ar šalinimo vietas. Pirminiai duomenys apdoroti bei kiekybinių kriterijų reikšmės skirtingiems I & D būdams įvertintos naudojant LEI Branduolinės inžinerijos problemų laboratorijoje sukurtą kompiuterinę programą DECRAD [2].

Antrajame šių publikacijų serijos straipsnyje apžvelgti dažniausiai naudojami daugiakriterinių sprendimų analizės (MCDA – angl. *Multiple Criteria Decision Analysis*) metodai, atliktas metodų palyginimas ir išrinkti tinkamiausi suformuluotai problemai spręsti, pateikta AE įrangos I & D būdo parinkimo metodika bei jos taikymo rezultatai IAE V1 pastatui.

DAUGIAKITERINIŲ SPRENDIMŲ ANALIZĖS METODŲ APŽVALGA IR PALYGINIMAS

Literatūroje yra aprašoma daug skirtingas savybes turinčių daugiakriterinių sprendimų analizės metodų. Skirtingi autoriai įvairiuose literatūros šaltiniuose pateikia įvairių metodų klasifikaciją [3, 4]. Bet vienas dažniausiai naudojamų – klasifikavimas pagal naudojamų duomenų tipą. Taigi, pagal naudojamą duomenų tipą tokie metodai skirstomi į tris grupes: deterministiniai, stochastiniai (tikimybiniai) ir neapibrėžtų aibių.

Šiame straipsnyje toliau bus lyginami neapibrėžtų aibių metodas (angl. FUZZY) bei plačiausiai praktikoje naudojami deterministiniai metodai:

- analitinis hierarchinis procesas (angl. *Analytic Hierarchy Process* – AHP);
- WSM (angl. *Weighted Sum Model*) ir WPM (angl. *Weighted Product Model*);
- prioritetiškumo (angl. *Outranking*) metodai – ELECTRE (angl. *ELimination and Choice Expressing REality*) ir PROMETHEE (angl. *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*);
- TOPSIS (angl. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*);
- MAUT (angl. *Multi Attribute Utility Theory*).

Mokslinėje literatūroje [3, 4, 7, 14] teigiama, jog nėra universalus metodo, tinkamo visoms daugiakriterinėms sprendimų analizės problemoms vertinti, kiekvienas metodų turi savo privalumų ir trūkumų. Todėl pasirinkti metodai toliau apžvelgiami pagal atitikimą nagrinėjamos problemos specifikai.

Kadangi nagrinėjama problema yra inžinerinė, svarbu, kad ir pasaulinėje praktikoje pasirinktais metodais būtų sprendžiamos inžinerinės daugiakriterinių sprendimų analizės problemos. Daugiausia tokių problemų sprendimo pavyzdžių galima rasti pasitelkus AHP metodą [5, 6]. Taip pat nemažai pavyzdžių ELECTRE ir PROMETHEE metodais [7] ir neapibrėžtų aibių metodu [8, 9]. Šiuo metodu netgi buvo atliktas paviršinio radioaktyviųjų atliekų atliekyno

aiškštelių įvertinimas [10]. Žinoma, inžinerinės daugiakriterinių sprendimų analizės problemų pavyzdžių yra daugiau. Šiame straipsnyje pateikta tik keletas iš jų (apibendrintą vertinimą žiūrėti 1 lentelėje).

Grupinis sprendimų priėmimas užtikrina ekspertinių vertinimų nešališkumą. Tuo atveju, jei daugiakriterinių sprendimų analizės metodas neturi procedūrai vertinti kelių ekspertų vertinimus nagrinėjant tą pačią problemą, tai tada apskaičiuojamas ekspertų vertinimų aritmetinis vidurkis.

Iš visų lyginamųjų metodų tik vienintelis AHP naudoja hierarchinę uždavinio struktūrą, kuri leidžia nagrinėjamą problemą suskaidyti į mažesnes ir aiškesnes dalis ir taip lengviau ją analizuoti. Tai labai svarbu nagrinėjant inžinerines daugiakriterinių sprendimų analizės problemas.

AHP, ELECTRE, PROMETHEE, TOPSIS ir MAUT metodai užtikrina ekspertinio vertinimo įverčių suderinamumą (logiškas vertinimas) arba nurodo nesuderinamumo lygį, kuris iki tam tikro lygio yra priimtinas ir nedaro įtakos galutiniam I & D būdo vertinimui.

Visi nagrinėti metodai I & D būdus gali vertinti tiek kokybiniais, tiek kiekybiniais kriterijais (išskyrus WSM ir WPM), o kriterijai gali būti skirtingų matavimo vienetų (išskyrus WSM).

Metodo suprantamumas – gana subjektyvi sąvoka, apibūdinanti paprastą ar sudėtingą suprasti uždavinio sprendimo eigą, gautus rezultatus ir juos lemiančius veiksnius. Lengviausiai suprantami yra WSM ir WSP metodai, o prioritetiškumo – TOPSIS ir MAUT metodai yra sunkiai suprantami.

Lyginant darbo sąnaudas vertinama, ar konkrečiam metodui yra reikalinga speciali programinė įranga, padedanti įvertinti uždavinio rezultatus, ir kiek pastangų reikia įdėti, norint juos apskaičiuoti. Taikant WSM ir WPM metodus, net ir santykinai didelės apimties uždaviniui spręsti, specialioji programinė įranga nėra būtina. Priešingai, taikant prioritetiškumo, TOPSIS ar MAUT metodus net ir nedidelės apimties daugiakriteriniam uždaviniui, sunku atlikti skaičiavimus be specialios programinės įrangos. AHP ir FUZZY metodų atveju, specialiosios programinės įrangos taikymas priklauso nuo uždavinio sudėtingumo.

1 lentelėje pateikiamas nagrinėtų daugiakriterinių sprendimų analizės metodų palyginimo apibendrinimas.

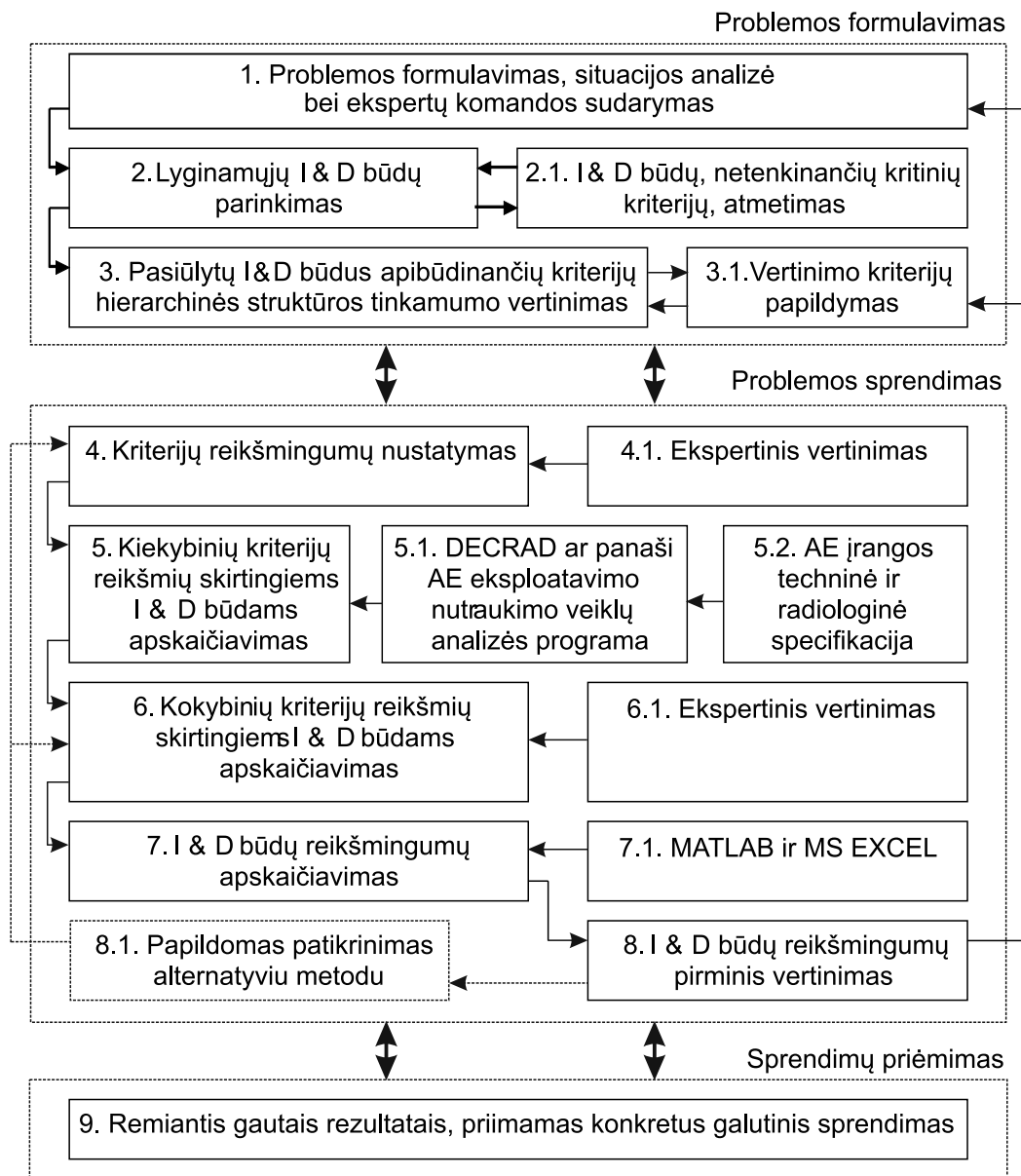
Remiantis 1 lentelės duomenimis, daugiakriterinės analizės metodikai formuoti parinkti du daugiakriterinių sprendimų analizės metodai: palankiausių palyginimo įvertinimą gavusi AHP (pasaulinė praktika inžineriniams MCDA uždaviniams spręsti) ir taip pat gana palankų įvertinimą gavusį FUZZY (nedeterministinis).

METODIKA

Remiantis problemos specifika ir daugiakriterinių sprendimų analizės metodų palyginimu, sudaryta tinkamiausio AE įrangos išmontavimo būdo parinkimo metodika (1 pav.).

1 lentelė. Daugiakriterinių metodų palyginimas

	AHP	FUZZY	WSM	WPM	ELECTRE PROME-THEE	TOPSIS	MAUT
Pasaulinė praktika inž. MCDA uždav. spęsti	+	+	-	-	±	±	±
Grupinis sprendimų priėmimas	Aritmetinis vidurkis	+	+	+	Aritmetinis vidurkis	Aritmetinis vidurkis	Aritmetinis vidurkis
Uždavinio struktūra	Hierarchinė	Tiesinė	Tiesinė	Tiesinė	Tiesinė	Tiesinė	Tiesinė
Įverčių suderinamumo užtikrinimas	+	-	-	-	+	+	+
Kokybinių kriterijų įvertinimas	+	+	-	-	+	+	+
Skirtingos kriterijų matavimo dimensijos	+	+	-	+	+	+	+
Metodo suprantamumas	Vidutinis	Vidutinis	Paprastas	Paprastas	Sudėtingas	Sudėtingas	Sudėtingas
Darbo sąnaudos	Vidutinės	Vidutinės	Mažos	Mažos	Didelės	Didelės	Didelės



1 pav. Problemos sprendimo metodika

Metodika susideda iš trijų pagrindinių dalių:

- problemos formulavimo;
- problemos sprendimo;
- sprendimų priėmimo.

Metodikos skirstymas į tris pagrindines dalis jokiū būdu nereiškia, kad suformavus problemą ir su ja susijus kintamuosius, daugiau prie problemos formulavimo nebus grįžtama, ar pasiekus sprendimų priėmimo dalį, jau nebe galima grįžti į problemos sprendimo dalį. Toks problemos sprendimo projekto skirstymas yra sąlyginis ir naudojamas dėl aiškumo. Realiai problemos nagrinėjimo iteracijos gali būti kartojamos daugelį kartų, kol pasiekiamas tinkamiausias sprendimas.

Problemos formulavimas

Šioje dalyje atliekama situacijos analizė ir suformuluojama pagrindinė problema. Taip pat sudaroma specialistų grupė (buvo parinkti branduolinės energetikos eksploataavimo nutraukimo ekspertai).

Lyginami I & D būdai turi būti aiškiai suformuluoti ir apibrėžti, išryškinti jų skirtumai, o patys I & D būdai turi būti charakteringi suformuluotai problemai. Parenkant I & D būdus, iš tolimesnio vertinimo atmetami tie, kurie netenkina kritinių vertinimo kriterijų (pvz., siūlo naudoti eksperimentines I & D technologijas).

Pirmajame šios serijos straipsnyje buvo pateiktas hierarchinis vertinimo kriterijų sąrašas (2 lentelė), kuris buvo

2 lentelė. Hierarchinis kriterijų ir jų savybių sąrašas [1]

Kriterijus	Žemesniojo lygio kriterijus	Aprašymas	Kriterijaus tipas	Matavimo vienetai
M1. Atliekų srautų	M1. 1. Pirminių atliekų masė į NLMK	Nusakomas santykis tarp visos pirminės masės ir pirminės masės, kuri bus transportuojama į nekontroliuojamų lygių matavimo kompleksą (NLMK). Svarbu yra pirminės atliekų masės pasiskirstymas pagal galutinius atliekų šalinimo maršrutus. Kuo daugiau (%) masės transportuojama į NMLK, tuo mažiau lieka radioaktyviųjų atliekų.	Kiekybinis	Procentai
	M1. 2. Antrinių atliekų masė į NLMK	Santykis tarp visos antrinės masės ir antrinės masės, kuri bus transportuojama į nekontroliuojamų lygių matavimo kompleksą (NLMK). Svarbu yra antrinės atliekų masės pasiskirstymas pagal galutinius atliekų šalinimo maršrutus. Kuo daugiau (%) masės transportuojama į NMLK, tuo mažiau lieka radioaktyviųjų atliekų.	Kiekybinis	Procentai
	M1. 3. Antrinių atliekų masės susidarymas	I & D metu susidaranti antrinių atliekų (metalo drožlės, panaudotos pjovimo priemonės, filtrai, dujos, abrazyvas ir kt.) kiekis.	Kiekybinis	Tonos
E1. Ekonominis	E1. 1. Pradinės investicijos	I & D darbams reikės įsigyti tam tikrą įrangą (keltuvus, pjovimo, dezaktyvavimo, radiologinių matavimų ir elektros įrangą, konteinerius atliekų šalinimui bei transportavimui ir kt.), kuri leistų greitai ir efektyviai atlikti suplanuotus darbus.	Kiekybinis	Eurai
	E1. 2. Projekto išlaidos	Bendros projekto įgyvendinimo išlaidos.	Kiekybinis	Eurai
T1. Trukmės	T1. 1. Projekto įgyvendinimo trukmė	Trukmė mėnesiais, nuo projekto pradžios iki pabaigos.	Kiekybinis	Mėnesiai
	T1. 2. Darbo jėga	Reikalinga darbo jėga išreiškta žmogaus dienomis (pvz.: viena žmogaus diena reiškia, kad vienas žmogus dirba vieną darbo dieną arba du žmonės dirba tą patį darbą po pusę dienos). Kriterijus vertina darbų sudėtingumą ir trukmę.	Kiekybinis	Žm. dienos
S1. Saugos	S1.1. Darbuotojų sauga (radiacinė)	Tikimybė, kad gali būti viršyta leistina suminė apšvitos dozė (mSv) atliekant I & D veiklas.	Kokybinis	Ekspertinis vertinimas
	S1.2. Darbuotojų sauga (ne radiacinė)	Tikimybė, kad dirbant su toksiškais ir pavojingais atliekais gali būti pakenkta darbuotojams, atliekant I & D veiklas.	Kokybinis	Ekspertinis vertinimas
P1. Procesų techninis	P1. 1. Egzistuojančios infrastruktūros panaudojimas	Kaip efektyviai išmontuojant nereikalingą įrangą panaudojama egzistuojanti infrastruktūra (kranai, liftai, bėgiai ir kt.) ir kaip stipriai keičiami pastato parametrai (griaunamos / statomos pertvaros, lyginamos grindys, modifikuojama / statoma nauja ventiliacijos sistema, elektros ir duomenų perdavimo tinklai ir kt.).	Kokybinis	Ekspertinis vertinimas
	P1. 2. Procesų brandumo lygis	Panašių projektų patirtis naudojant tokius pačius procesus ir įrangą I & D veikloms kitose AE.	Kokybinis	Ekspertinis vertinimas
	P1. 3. Procesų patikimumas	Procesų ir įrangos patvarumas ir patikimumas.	Kokybinis	Ekspertinis vertinimas

kurtas atsižvelgiant į VI pastato specifiką, bet gali būti naudojamas kaip bazinis, sprendžiant AE nebenaudojamos įrangos tinkamiausio I & D būdo parinkimo problemas. Reikia pažymėti, kad jeigu būtų vertinami degūs komponentai, o įranga būtų užteršta ilgaamžiais radionuklidais, I & D būdo parinkimas pasikeistų, tada reiktų vertinimo kriterijų sąrašą išplėsti. Vertinimo kriterijai turėtų išsamiai apibūdinti vertinamus I & D būdus, o neesminius kriterijus reiktų atmesti.

Problemos sprendimas

Perėjus prie problemos sprendimo pirmiausia ekspertinio vertinimo metu yra nustatomas kriterijų reikšmingumas (santykiniai svoriai).

Nagrinėjant kompleksinius inžinerinius uždavinius, kiekybiniai kriterijai dažniausiai sudaro didžiąją kriterijų dalį ir jų patikimumas yra akivaizdžiai didesnis negu kokybinių. Kiekybiniai kriterijai įvertinami naudojant realius duomenis. Tokių duomenų šaltiniai dažniausiai būna: įrangos techninės specifikacijos (naujose AE dažnai būna įrangos ir sistemų brėžiniai 3D formatu), AE atveju – radiologiniai duomenys, įvairios ataskaitos, protokolai ir straipsniai. Dažnai trūkstantis duomenis inžinieriai / ekspertai turi surinkti realiai inventorizuodami išmontuojamą įrangą.

Kiekybinių duomenų kiekis paprastai būna labai didelis, todėl jiems apdoroti naudojami programinės įrangos paketai, kurie specialiai pritaikyti analizuoti AE įrangos išmontavimo veiklas (pvz., DECRAD). Tokios programos, naudodamos įrangos techninės specifikacijos duomenis, radiologinių matavimų duomenis, atliekų srautų klasifikatorius ir daugelį kitų įvesties duomenų, gali pateikti reikalingus kiekybinius parametrus (ekonominius skaičiavimus, I & D veiklų trukmes, darbuotojų gaunamas apšvitos dozės, pirminių ir antrinių atliekų srautus, pakuočių kiekius, išteklių panaudojimą ir kt.).

Priešingai negu kiekybiniai kriterijai, kokybinių kriterijų vertinimai išreiškiami skaitinėmis išraiškomis naudojant ekspertinį vertinimą. Ekspertai vertinimus atlieka porinio palyginimo arba rangavimo metodais. Pvz., kriterijų reikšmingumo nustatymui taikant porinio palyginimo metodą [11], kiekvienas ekspertas į matricos eilutės ir stulpelio sankirtos tašką įrašo savo įvertinimą pp_{ij} (priklauso nuo naudojamos skalės), kiek i kriterijus yra svarbesnis už j . Porinių palyginimų matrica (PP) pateikta 3 lentelėje.

Taikant AHP metodą ekspertiniai vertinimai paverčiami skaitinėmis reikšmėmis naudojant vertinimo skalę (4 lentelė), kuri yra abstrakčių lingvistinių vertinimo rinkinių ir sveikų skaičių aibės, kuri nurodo I & D būdų ar kriterijų svorius, atitikmuo.

3 lentelė. Porinio palyginimo matrica (PP)

Kriterijai	K_1	K_2	K_3	...	K_j	...	K_N
K_1	1	pp_{12}	pp_{13}	...	...	...	pp_{1N}
K_2	pp_{21}	1	pp_{23}	...	...	...	pp_{2N}
K_3	pp_{31}	pp_{32}	1	...	...	...	pp_{3N}
...
K_j	pp_{j1}	pp_{j2}	pp_{j3}	...	1	...	pp_{jN}
...
K_N	pp_{N1}	pp_{N2}	pp_{N3}	...	pp_{Nj}	...	1

4 lentelė. AHP metodo kokybinių kriterijų vertinimų skalė [13]

Vertinimas (reitingas)	Vertinimo (reitingavimo) apibrėžimas	Vertinimo (reitingavimo) paaiškinimas
1	Alternatyvos lygios	Abi alternatyvos kriterijaus atžvilgiu vienodos.
3	Silpnai pranašesnė alternatyva	Remiantis eksperto patyrimu ir nuomone (nagrinėjamo kriterijaus atžvilgiu), alternatyva silpnai pranašesnė už kitą alternatyvą.
5	Svarbus alternatyvos pranašumas	Remiantis eksperto patyrimu ir nuomone (nagrinėjamo kriterijaus atžvilgiu), alternatyva turi svarbų pranašumą, palyginti su kita alternatyva.
7	Akivaizdžiai geresnė alternatyva	Alternatyva turi akivaizdų pranašumą (nagrinėjamo kriterijaus atžvilgiu), ir tas pranašumas yra pasitvirtinęs praktikoje.
9	Absoliučiai geresnė alternatyva	Alternatyva turi absoliučiai neginčijamą pranašumą (nagrinėjamo kriterijaus atžvilgiu).
2, 4, 6, 8	Tarpinės reikšmės	Kai reikalingas kompromisas tarp anksčiau išvardintų vertinimų.
1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9	Jei vertinamos alternatyvos pagal kriterijų x , o alternatyva A turi vieną iš anksčiau aprašytų vertinimų, palyginti ją su alternatyva B (R_{xAB}), tada alternatyva B turės atvirkštinį vertinimą, palyginti su alternatyva A (R_{xBA} arba $1 / R_{xAB}$).	

Neapibrėžtų aibių FUZZY metodu norint ekspertinius vertinimus paversti skaitinėmis reikšmėmis, kiekvienam lingvistiniam atitikmeniui, atitinkamai pagal jo svarbą, priskiriami svoriai, kurie yra sudaromi iš viena kitą dengiančių FUZZY aibių (intervalas [0; 1], kur 0 yra blogiausia reikšmė, o 1 – geriausia) (5 lentelė). Šiuo atveju priklausomybės aibei funkcija yra trapecijos formos.

5 lentelė. FUZZY metodo lingvistinių vertinimų konvertavimo į skaitines reikšmes sąryšis [12]

Lingvistinis atitikmuo	Skaitinė reikšmė
Labai blogas	(0 0 0 0,2)
Tarp blogo ir labai blogo	(0 0,1 0,2 0,3)
Blogas	(0 0,2 0,2 0,4)
Tarp blogo ir vidutiniško	(0 0,2 0,5 0,7)
Vidutiniškas	(0,3 0,5 0,5 0,7)
Tarp vidutiniško ir gero	(0,3 0,5 0,8 1)
Geras	(0,6 0,8 0,8 1)
Tarp gero ir labai gero	(0,7 0,9 0,9 1)
Labai geras	(0,8 1 1 1)

Kokybinių kriterijų vertinimo patikimumas yra žemesnis negu kiekybinių, bet dažnai neįmanoma sėkmingai išspręsti inžinerinių daugiakriterinių sprendimų analizės I & D būdų parinkimo problemų nenaudojant kokybinių kriterijų, kurių svoris parenkant galutinį I & D būdą yra pakankamai reikšmingas. Todėl būtina užtikrinti logišką ir patikimą vertinimą, kai naudojami kokybiniai kriterijai. Todėl kiekvienam poriniam palyginimui skaičiuojamas suderinamumo santykis (CR). Jeigu CR reikšmė mažiau arba lygi 10 %, toks porinis palyginimas laikomas tinkamu. Jeigu CR daugiau negu 10 %, tokį porinį palyginimą reikia pakartoti, kad sumažėtų vertinimo nesuderinamumas [13].

I & D būdų reikšmingumą apskaičiavimas gali būti lengvai vaizduojamas $M \times N$ matrica – A (6 lentelė), kur elementai a_{ij} parodo I & D būdo A_i įvertį, kai jis vertinamas atsižvelgiant į kriterijų K_j (kur $i = 1, 2, 3, \dots, M$, ir $j = 1, 2, 3, \dots, N$). Jeigu turime minimizavimo uždavinį, tai kuo mažesnis a_{ij} , tuo I & D būdas labiau tinkamas problemai spręsti. Kaip parodyta matricoje A, svoriai S_1, \dots, S_N yra

priskirti atitinkamiems kriterijams. Svoris S_i atitinka kriterijaus K_i reikšmingumą priimant sprendimą.

Surinkus visus pradinius duomenis ir pasirinkus daugiakriterinių sprendimų analizės metodą, atliekamas I & D būdų vertinimas (a_{ij}). Rinkoje yra nemažai programinės įrangos paketų, kuriais skaičiuojama naudojantis AHP metodu. Pvz., *EXPERT CHOICE*, *HIPRE3+*, *HIVIEW (MACBETH)* ir kt. Visi jie yra pakankamai geri ir labai naudingi sprendžiant bei analizuojant sudėtingus uždavinius.

Jeigu daugiakriterinių sprendimų analizės uždavinys nėra labai didelis, galima nenaudoti specialios programinės įrangos, o naudoti universalius programinius paketus, pvz., *MATLAB* ir *MS EXCEL*.

Nustčius vertintų I & D būdų santykinis svorius (rangus), būtina atlikti pirminis reikšmingumą vertinimas. Tokio vertinimo metu nustatoma, ar pirmo ir antro (pagal rangus) I & D būdo santykinis svorių skirtumas yra pakankamas atsižvelgiant į nagrinėjamos problemos ypatybes. Tada sprendžiama, ar reikia įtraukti papildomų ekspertų ar specifinių (nagrinėjamai problemai) vertinimo kriterijų.

Atsižvelgiant į nagrinėjamo uždavinio specifiką (pvz., išmontuojamos radioaktyviosios atliekos), uždavinį tikslinga papildomai išspręsti ir alternatyvuoju metodu (kaip alternatyvūs AHP metodui buvo naudotas neapibrėžtų aibių metodas). Jeigu išsprendus antruoju metodu I & D būdų rangavimas sutampa (bent pirmų dviejų), tikslinga būtų pereiti prie galutinio sprendimo priėmimo stadijos. Priešingu atveju reikėtų peržiūrėti ekspertinio vertinimo rezultatus, kuriais buvo nustatinėjamas kriterijų reikšmingumas ir kokybinių kriterijų pagalba vertinami I & D būdai.

Sprendimų priėmimas

Daugiakriterinių sprendimų analizės metodų rezultatus dažniausiai reikėtų naudoti kaip rekomendacinius priimant galutinį sprendimą. Ypač kai skirtumas tarp I & D būdų yra labai mažas. Kuo skirtumas tarp I & D būdų mažesnis, tuo sprendimus priimantys tyrėjai turėtų būti atsargesni ir įvertinti galimus papildomus sprendimo kriterijus ar pasitelkti ekspertų, kurie galėtų artimus I & D būdus diferencijuoti.

6 lentelė. Tipinė sprendimų matrica (A)

	Kriterijai / Svoriai				
	K_1	K_2	K_3	...	K_N
	S_1	S_2	S_3	...	S_N
Alternatyvos					
A_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	...	a_{1N}
A_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	...	a_{2N}
A_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	...	a_{3N}
...
A_i	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{ij}	a_{iN}
...
A_M	a_{M1}	a_{M2}	a_{M3}	...	a_{MN}

SKAIČIAVIMO REZULTATAI

Pasinaudojant šios publikacijų serijos pirmajame straipsnyje suformuluotais IAE nebenaudojamos įrangos I & D būdais (7 lentelė), sudarytu kriterijų sąrašu (2 lentelė) bei šiame straipsnyje sudaryta metodika, buvo atlikti skaičiavimai.

8 lentelėje pateikta eksperto Nr. 1 kriterijų reikšmingumo vertinimo matrica. Ekspertas Nr. 1 kiekvieną kriterijų lygina su kitais kriterijais ir nurodo, kiek kartų vienas lyginamasis kriterijus geresnis / blogesnis už kitą lyginamąjį kriterijų. Matricos diagonalėje kiekvienas kriterijus lyginamas su pačiu savimi, todėl įvertis lygus vienetui. Stulpelyje suskaičiavus matricos tikrines reikšmes ir išsprendus lygčių sistemą, gaunami kriterijų santykiniai svoriai [12]. Ekspertas Nr. 1 svarbiausiais reitingavimo kriterijais laiko S1, E1 ir M1. T1 kriterijus – mažiau svarbus, o P1, eksperto Nr. 1 manymu, visai nesvarbus. Suderinamumo santykis (CR) lygus 1 %. Jeigu CR reikšmė mažesnė negu 10 %, porinio palyginimo matrica laikoma suderinta. Jei CR reikšmė

didesnė, matricą rekomenduojama užpildyti iš naujo, kad pašalintume porinio palyginimo nesuderinamumus [12]. Tokia pačia tvarka buvo atlikti ir eksperto Nr. 2 aukščiausio lygio kriterijų reikšmingumo vertinimai (straipsnyje jie nedetalizuojami).

Kadangi kriterijai yra suformuoti hierarchinėje struktūroje, tai kiekvienas kriterijus turi keletą žemesnio lygio kriterijų. 9 lentelėje pateikta eksperto Nr. 1 (M.1) žemesnio lygio kriterijų reikšmingumo vertinimo matrica. Apskaičiavus gauta, kad kriterijus M1.1 gavo didžiausią svorį, M1.2 svoris įvertintas kaip labai mažai reikšmingas, o M1.3 – mažai reikšmingas. Suderinamumo santykis lygus 6 %, o tai mažiau negu rekomenduojama pakartotiniam vertinimui (10 %), todėl matrica yra suderinta. Tokia pačia tvarka ekspertai Nr. 1 bei Nr. 2 atliko ir kitų žemesnio lygio kriterijų reikšmingumų vertinimus, kurie čia nedetalizuojami.

10 lentelėje pateikta eksperto Nr. 1 I ir II I & D būdų palyginimas žemesnio lygio kriterijaus P1.3 arba procesų patikimumui. Eksperto manymu, II I & D būdas kriterijaus

7 lentelė. Nebenaudojamos įrangos IAE V1 pastate I & D būdai

I & D būdas	I & D būdo paaiškinimas
I	Atliekama atitinkamų užterštų išmontuotų komponentų mechaninė dezaktyvacija, t. y. radioaktyvūs išmontuoti komponentai dezaktyvuojami iki 0 klasės atliekų lygio (jei tai įmanoma), o išmontavimo ir dezaktyvavimo metu susidariusios antrinės radioaktyviosios atliekos bei kiti komponentai, kurių dezaktyvuoti iki 0 klasės lygio nepavyksta, atitinkamai šalinami LMAA atliekyne (A klasės atliekos) arba gabenami į apdorojimo kompleksą (B34) (B, F klasių atliekos) tolimesniam apdorojimui ir saugojimui iki šalinimo paviršiniame atliekyne;
II	Užterštų išmontuotų komponentų mechaninė dezaktyvacija neatliekama, t. y. išmontuoti komponentai nėra dezaktyvuojami, o tiesiog užteršti komponentai – A klasės atliekos – gabenamos į LMAA atliekyną, o B ir F klasių atliekos – gabenamos į B34 kompleksą tolimesniam apdorojimui ir saugojimui iki šalinimo paviršiniame atliekyne.

8 lentelė. Kriterijų reikšmingumai (eksperto Nr. 1 vertinimas)

Kriterijai	S1	E1	T1	P1	M1	Santykinis svoris	CR
S1. Saugumo	1	1	3	5	1	0,2808	1 %
E1. Ekonominis	1	1	3	5	1	0,2808	
T1. Trukmės	1/3	1/3	1	3	1/3	0,1070	
P1. Procesų-techninis	1/5	1/5	1/3	1	1/5	0,0505	
M1. Atliekų srautų	1	1	3	5	1	0,2808	

9 lentelė. Žemesnio lygio kriterijų reikšmingumai (eksperto Nr. 1 vertinimas)

M1. Atliekų srautai	M1.1	M1.2	M1.3	Santykinis svoris	CR
M1.1	1	7	5	0,7306	6 %
M1.2	1/7	1	1/3	0,0810	
M1.3	1/5	3	1	0,1884	

10 lentelė. I & D būdų palyginimas (pagal kokybinį kriterijų)

P1.3	I	II	Santykinis svoris	CR
I	1	1/3	0,2500	0 %
II	3	1	0,7500	

P1.3 atžvilgiu yra geresnis už I būdą tris kartus. Vertinimo suderinamumas lygus 0 %, nes lyginami tik du I & D būdai. Kitų kokybinių kriterijų ir kito eksperto I & D būdai vertinami tokia pačia tvarka, todėl toliau tai nedetalizuojama.

11 lentelėje pateikta I ir II I & D būdų palyginimas žemesniojo lygio kriterijaus M1.3 arba dėl antrinių atliekų susidarymo. Kiekybinių kriterijų atžvilgiu vertinant I & D būdus neatliekamas ekspertinis vertinimas, o apskaičiuojamas santykinis svoris iš apdorotų pirminių duomenų. Gauta, kad II I & D būdas kriterijaus M1.3 atžvilgiu vertinamas geriau negu I būdas. Kitų kiekybinių kriterijų atžvilgiu I & D būdai vertinami tokia pačia tvarka, todėl toliau nedetalizuojami.

2 pav. pateikta eksperto Nr. 1 vertinimu sudaryta nebenaudojamos įrangos pašalinimo iš IAE V1 pastato tin-

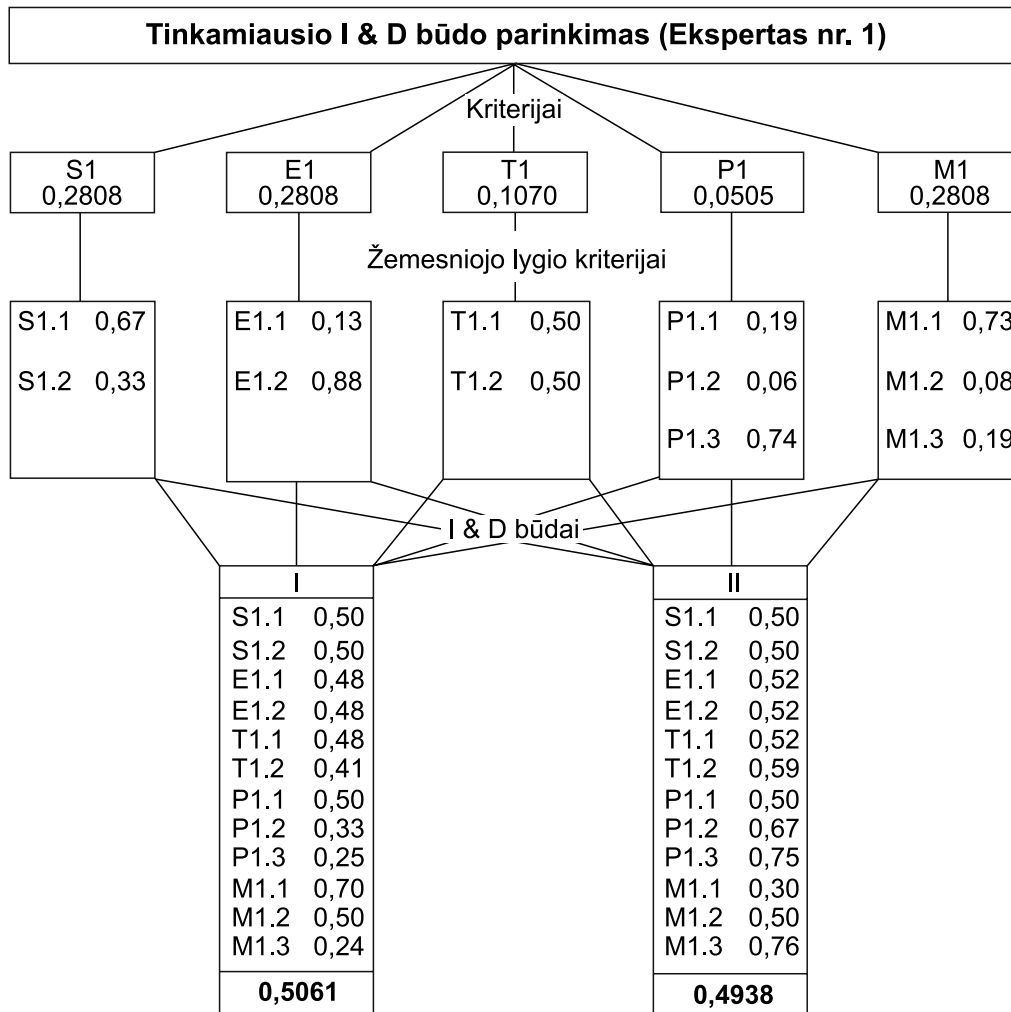
kamiausio I & D būdo parinkimo daugiakriterinio uždavinio hierarchinė schema. Schemoje matyti eksperto Nr. 1 vertinimų santykiniai svoriai (kriterijų ir žemesniojo lygio kriterijų bei I & D būdų palyginimas su kriterijais), apskaičiuoti AHP metodu.

Didžiausią santykinį svorį pirmasis ekspertas suteikė S1 (saugumo), E1 (ekonominiams) ir M1 (atliekų srautų) kriterijams. Apskaičiuotus suminius kriterijų ir žemesniojo lygio kriterijų svorius gauta, kad žemesniojo lygio kriterijai: S1.1 (darbuotojų radiacinė sauga), E1.2 (projekto išlaidos) ir M1.1 (pirminė masė į NLMK), eksperto Nr. 1 manymu, yra svarbiausi vertinant I & D būdus. Taip pat įvertinti I & D būdų palyginimų įverčiai kriterijų atžvilgiu. Apskaičiuoti galutiniai rezultatai parodė, kad I I & D būdas yra šiek tiek geresnis už II būdą.

Taip pat AHP metodu nustatyti eksperto Nr. 2 vertinimų santykiniai svoriai (aukščiausiojo ir žemesniojo lygių kriterijų bei I & D būdų palyginimas su kriterijais). Didžiausią santykinį svorį ekspertas Nr. 2 suteikė M1 (atliekų srautų) kriterijui. Nustačius suminius kriterijų ir žemesniojo lygio kriterijų svorius gauta, kad žemesniojo lygio kriterijus M1.1

11 lentelė. I & D būdų palyginimas (pagal kiekybinį kriterijų)

M1.3	I	II	Santykinis svoris	t
I			0,2447	
II			0,7553	



2 pav. Eksperto Nr. 1 daugiakriterio uždavinio schema

12 lentelė. Apibendrinti I & D būdų vertinimo rezultatai

I & D būdai	Eksperto Nr. 1 vertinimas	Eksperto Nr. 2 vertinimas	Bendras vertinimas
I	0,5061	0,5361	0,5211
II	0,4938	0,4639	0,4789

13 lentelė. FUZZY metodo žemesniojo lygio kriterijų reikšmingumų skaičiavimas

Žemesniojo lygio kriterijai	Ekspertas Nr. 1	Eksperto Nr. 1 FUZZY reikšmė				Ekspertas Nr. 2	Eksperto Nr. 2 FUZZY reikšmė				wi	Vidurkis			
S1.1	G	0,6	0,8	0,8	1	V	0,3	0,5	0,5	0,7	w1	0,45	0,65	0,65	0,85
S1.2	V_G	0,3	0,5	0,8	1	V	0,3	0,5	0,5	0,7	w2	0,3	0,5	0,65	0,85
E1.1	V	0,3	0,5	0,5	0,7	V	0,3	0,5	0,5	0,7	w3	0,3	0,5	0,5	0,7
E1.2	G_LG	0,7	0,9	0,9	1	G	0,6	0,8	0,8	1	w4	0,65	0,85	0,85	1
T1.1	B_V	0	0,2	0,5	0,7	LB_B	0	0,1	0,2	0,3	w5	0	0,15	0,35	0,5
T1.2	B_V	0	0,2	0,5	0,7	B_V	0	0,2	0,5	0,7	w6	0	0,2	0,5	0,7
P1.1	B_V	0	0,2	0,5	0,7	LB	0	0	0	0,2	w7	0	0,1	0,25	0,45
P1.2	LB	0	0	0	0,2	LB_B	0	0,1	0,2	0,3	w8	0	0,05	0,1	0,25
P1.3	B_V	0	0,2	0,5	0,7	B	0	0,2	0,2	0,4	w9	0	0,2	0,35	0,55
M1.1	LG	0,8	1	1	1	LG	0,8	1	1	1	w10	0,8	1	1	1
M1.2	V_G	0,3	0,5	0,8	1	V_G	0,3	0,5	0,8	1	w11	0,3	0,5	0,8	1
M1.3	B_V	0	0,2	0,5	0,7	V	0,3	0,5	0,5	0,7	w12	0,15	0,35	0,5	0,7

14 lentelė. FUZZY metodo I & D būdų palyginimas (pagal žemesniojo lygio kriterijų P1.3)

P1.3	Ekspertas Nr. 1	Eksperto Nr. 1 FUZZY reikšmė				Ekspertas Nr. 2	Eksperto Nr. 2 FUZZY reikšmė				S _{ji}	Vidurkis			
I	V_G	0,3	0,5	0,8	1	V_G	0,3	0,5	0,8	1	S ₉₁	0,3	0,5	0,8	1
II	B_V	0	0,2	0,5	0,7	V	0,3	0,5	0,5	0,7	S ₉₂	0,15	0,35	0,5	0,7

(pirminė masė į NLMK), antrojo eksperto manymu, yra svarbiausias vertinant I & D būdus. Taip pat suskaičiuoti I & D būdų palyginimų įverčiai kriterijų atžvilgiu. Galutiniai rezultatai parodė, kad I I & D būdas yra geresnis už II būdą.

Alternatyvų santykiniai svoriai mažai skiriasi (2 pav.) (ekspertas Nr. 1), todėl reiktų ypač atidžiai vertinti gautus rezultatus ir dar įvertinti papildomus kriterijus arba įtraukti daugiau ekspertų. Daugiakriterinė problema buvo sprendžiama vertinant dviejų ekspertų nuomones. Apibendrinus abiejų ekspertų vertinimo rezultatus (12 lentelė), gaunami pakankamai diversifikuoti I & D būdai (I geresnis beveik 9 %).

Dažnai tai būtų pakankamas įrodymas, kad I I & D būdas yra tikrai geresnis už II būdą. Tačiau nagrinėjama problema yra padidinto pavojaus (susidaro radioaktyviosios atliekos), todėl I & D būdai tikrinami papildomai. Papildomam patikrinimui buvo parinktas neapibrėžtų aibių FUZZY metodas.

FUZZY metodas nenaudoja kriterijų hierarchinės struktūros, todėl reikšmingumai nustatomi tik žemesniojo lygio kriterijams (13 lentelė). 13 lentelėje ekspertų Nr. 1 ir Nr. 2 vertinimų lingvistiniai atitiktumai yra paverčiami FUZZY reikšmėmis ir apskaičiuojamas vidurkis. M1.1 ir E1.2 yra reikšmingiausi žemesniojo lygio kriterijai.

14 lentelėje pateikta ekspertų Nr. 1 ir Nr. 2 I ir II I & D būdų palyginimas žemesniojo lygio kriterijaus P1.3 arba procesų patikimumo atžvilgiu. Ekspertų manymu, I būdas pagal P1.3 kriterijų yra geresnis už II būdą. Pagal kitus kriterijus I & D būdai vertinami tokia pačia tvarka ir todėl toliau nedetalizuojami.

Papildomo patikrinimo rezultatai (15 lentelė) rodo, kad I I & D būdas yra 4 % geresnis negu II. Taigi rezultatai patvirtino I & D būdų rangavimą, gautą AHP metodu, todėl galima teigti, kad I & D būdai buvo ranguojami teisingai. Kadangi nebereikia peržiūrėti ekspertinio vertinimo rezultatų, toliau tikslinga pereiti prie sprendimo priėmimo etapo.

Didžiausią santykinį svorį surinko I I & D būdas, todėl jį būtų tikslinga parinkti išmontuojant tinkamiausią Ignalinos AE pastato V1 nebenaudojamą įrangą, kai susidaro nedegios, trumpaamžės, mažai ir vidutiniškai radioaktyvios atliekos.

15 lentelė. Papildomo I & D būdų patikrinimo rezultatai

I & D būdas	Ekspertų Nr. 1 ir Nr. 2 bendras vertinimas
I	1,0206
II	0,9841

APIBENDRINIMAI IR IŠVADOS

Pritaikius kompleksinių inžinerinių projektų įgyvendinimo strategijos pasirinkimo metodiką, grindžiamą daugiakriterinių sprendimų analizės metodais, ir parinkus tinkamiausią Ignalinos AE V1 pastato nebenaudojamos įrangos išmontavimo ir dezaktyvacijos (I & D) būdą, galima daryti šias išvadas:

- nustatyta, kad darbuotojų radiacinė sauga, projekto išlaidos ir neradioaktyviųjų (vertinant ir dezaktyvuotų) atliekų masė yra svarbiausi kriterijai vertinant išmontavimo ir dezaktyvavimo būdus;

- vertinimai, atlikti daugiakriterinės sprendimų analizės AHP metodu, parodė, kad I & D būdas, kai atliekama radioaktyviųjų komponentų dezaktyvacija (I būdas) yra geresnis už II, kai nėra atliekama radioaktyviųjų komponentų dezaktyvacija;

- daugiakriterinės sprendimų analizės FUZZY metodu atlikti papildomi vertinimai patvirtino AHP metodu gautus rezultatus, t. y. I & D I būdas yra geresnis už II. Taigi I & D I būdą tikslinga parinkti kaip tinkamiausią išmontuojant Ignalinos AE pastato V1 nebenaudojamą įrangą, kai susidaro nedegios, trumpaamžės, labai mažai aktyvios ir mažai / vidutiniškai aktyvios atliekos.

Gauta 2012 01 30

Priimta 2012 05 07

Literatūra

1. Sirvydas A., Poškas G., Šimonis A., Poškas P. Daugiakriterinės analizės metodo taikymas parenkant Ignalinos AE V1 pastato įrengimų išmontavimo būdą. 1. Kiekybinių kriterijų įvertinimas. *Energetika*. 2011. T. 57. Nr. 4. P. 195–206.
2. *The Software DECRAD Validation Report, TA-14-13.10*. LEL, Nuclear Engineering Laboratory, 2010.
3. Triantaphyllou E., Shu B., Nieto Sanchez S., Ray T. Multi-Criteria Decision Making: An Operations Research Approach. In: Webster J. G. (Ed.). *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. New York, NY, 1998. Vol. 15. P. 175–186.
4. Hwang C. L., Yoon K. *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1981.
5. Triantaphyllou E., Mann S. H. Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: some challenges. *Inter'l Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice*. 1995. Vol. 2. No. 1. P. 35–44.
6. Cimren E., Budak E., Catay B. Development of a machine tool selection system using analytic hierarchy process. *Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, 2006.
7. Caterino N., Iervolino I., Manfredi G., Cosenza E. Comparative Analysis of Multi-Criteria Decision-Making Methods for Seismic Structural Retrofitting. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2009. Vol. 24. P. 432–445.
8. Ross T. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. New York: McGraw-Hill, 1995.
9. De Lemos F. *Application of Fuzzy Logic to Total System Performance Assessment*. Brazil National Nuclear Energy Commission (CNEN), 2007.
10. Poskas P., Kilda R., Poskas G. Comparison of Candidate Sites for installation of Landfill facility at Ignalina NPP site using Fuzzy Logic approach. *WM2008 Conference, February 24–28, 2008, Phoenix, AZ*.
11. Saaty T. L. *Fundamentals of Decision-Making and Priority Theory with the AHP*. Pittsburg, PA, USA: RWS Publications, 1994.
12. Sule D. R. *Logistics of Facility Location and Allocation*. New York: Marcel Dekker, 2001.
13. Saaty T. L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw Hill, 1980.
14. Fülöp J. *Introduction to Decision Making Methods*. Working Paper 05-6, Laboratory of Operations Research and Decision Systems, Computer and Automation Institute, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, 2005. 15 p.

Gintautas Poškas, Povilas Poškas, Arūnas Sirvydas,
Audrius Šimonis

APPLICATION OF MULTI-CRITERIA ANALYSIS METHOD FOR SELECTING IGNALINA NPP UNIT V1 EQUIPMENT DESMANTLING METHOD

2. MULTI-CRITERIA ANALYSIS METHODOLOGY AND RESULTS OF ITS APPLICATION

Summary

In the second article of this series, comparison of multi-criteria decision analysis methods was performed and two methods were selected: AHP and FUZZY. Based on those two methods, the methodology was developed and applied for the problem formulated in the first article of this series.

Experts' validation and calculation results show that the radiation doses to the workers, the project cost and non-radioactive (including decontaminated waste) waste mass are the most important criteria for assessing the dismantling and decontamination alternatives. Both methods (AHP and FUZZY) indicated that dismantling and decontamination Alternative 1 (when radioactive components

are decontaminated) is better than Alternative 2 (when radioactive components are not decontaminated) for the INPP Building V1 equipment dismantling case. It is therefore recommended to choose Alternative 1 as more appropriate for dismantling equipment in INPP Building V1 with non-combustible, short-lived very low- and low- / intermediate-level radioactive waste.

Key words: Ignalina NPP Building V1, equipment dismantling alternatives, application of multi-criteria decision analysis methods

Гинтаутас Пошкас, Повилас Пошкас, Арунас Сирвидас,
Аудрюс Шимонис

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА
ПРИ ВЫБОРЕ СПОСОБА ДЕМОНТАЖА
КОМПОНЕНТОВ ЗДАНИЯ В1 ИГНАЛИНСКОЙ АЭС**

**2. МЕТОДОЛОГИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО
АНАЛИЗА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ**

Резюме

Во второй статье данной серии сделан обзор и сравнение нескольких методов многокритериального анализа и были выбраны два метода АНР и FUZZY для использования в настоящей работе. На основе этих методов была разработана и применена методика для проблемы, сформулированной в первой статье данной серии.

Оценка экспертов и результаты расчётов показывают, что радиационные дозы для рабочих, стоимость проекта и масса нерадиоактивных отходов (включая дезактивированные) являются самыми важными критериями для оценки альтернативных способов демонтажа и дезактивации. Оба метода (АНР и FUZZY) показали, что $I^{вн}$ способ (когда выполняется дезактивация радиоактивных компонентов) демонтажа и дезактивации лучше, чем $II^{от}$ (когда не выполняется дезактивация радиоактивных компонентов). Следовательно, целесообразно выбрать $I^{вн}$ способ для монтажа и дезактивации оборудования включающего негорючие радиоактивные отходы очень низкой и низкой / средней активности.

Ключевые слова: Игналинская АЭС, здание В1, способы демонтажа оборудования, применение методов многокритериального анализа