

## EKSPERTNI SUSTAVI ZA ZAŠTITU OKOLIŠA S PRIMJENOM U RUDARSTVU

## EXPERT SYSTEMS FOR ENVIRONMENTAL PROTECTION IN MINING

DAMIR RUMENJAK

*Ministarstvo zaštite okoliša i prirode, Zagreb, Ulica Republike Austrije 14*

**Ključne riječi:** ekspertni sustavi, okolišni indikatori, mjere preferencije, ljestvice, neizrazita logika, lingvističke varijable, agregacija

**Key words:** expert systems, environmental indicators, measures of preference, scales, fuzzy logic, linguistic variables, aggregation

### Sažetak

Ekspertni sustavi primjenjuju se u različitim djelatnostima, s ciljem donošenja odluka na inteligentan i transparentan način. U poslovnim djelatnostima ekspertni sustavi usmjereni su k donošenju operativnih i ekonomskih odluka. U zaštiti okoliša, uvažavajući posebnosti različitih poslovnih djelatnosti, u izboru odluka koriste se i ostali aspekti odlučivanja, koji osim ekonomsko-operativnih razloga, vrednuju i druge razloge izbora odluka. Neizrazita logika je logički i matematički aparat, koji se preporuča za primjenu u takvim ekspertnim sustavima. U radu se prikazuju neke značajke i pravila konstrukcije ekspertnih sustava za primjenu u zaštiti okoliša u rudarstvu, a koji primjenjuju neizrazitu logiku.

### Abstract

Expert systems are used in various activities with the main goal of decision-making in intelligent and transparent way. In business decision-making, such systems are directed to pure operational and economical decisions. In environmental protection they have to accept the specificity of business sector for which they have been intended, but also use environmental reasons and evaluate them differently than economic. Fuzzy logic is logical and mathematical mean recommended for such expert systems. Some characteristics and rules for construction of systems based on fuzzy logic are provided in the work.

### Uvod: Pojam ekspertnih sustava

Ekspertni sustavi su sustavi povezivanja znanja i pravila primjene tog znanja u različitim područjima, kao i ostalih dijelova sustava bitnih za širu primjenu tog znanja. Osnovna primjena ekspertnih sustava je primjena u odlučivanju, odnosno izboru ili opravdanju pojedinih varijanti tehnoloških postupaka (ili dijelova postupaka) kada se radi o gospodarenju resursima, npr. u eksploataciji mineralnih sirovina.

U širem smislu, ekspertni sustavi pripadaju umjetnoj inteligenciji (Jackson, 1998).

Na slici 1. je opisan jednostavni ekspertni sustav s dijelovima i interakcijama bitnih dijelova i korisnika. Najvažniji dijelovi takvog sustava su baza znanja i pravila po kojima se to znanje primjenjuje, i koje čine ekspertnu školjku sustava.

Karakteristika baze znanja ekspertnih sustava su stalna promjena u skladu s neprekidnim razvojem i promjenom znanja u određenim područjima. Pravila se rjeđe mijenjaju. Na slici 1. označena je interakcija između ostalih dijelova sustava, prije svega ekspertnih timova koji doprinose ekspertnom znanju (koje vode

koordinatori koji moraju sagledavati cijeli sustav) te pravila i znanja, ali i korisnika koji utječu na konačno prihvaćanje (formalizaciju) znanja, pogotovo kada se ekspertni sustavi koriste u administrativnim postupcima, kao što je procjena utjecaja na okoliš. Korisnici, preko povratnih informacija, najčešće djeluju na cjelinu (školjku), dok je modifikacija unutar školjke najčešće stvar ekspertnih timova i koordinatora. Naravno, ovakva podjela uloga nije ograničenje u razvoju ekspertnih sustava, kao niti moguće interakcije koje se između dijelova sustava prema slici 1. još mogu uspostaviti.

Detaljnija podjela pravila u ekspertnim sustavima provodi se na pravila u sustavu i meta-pravila, kojima se omogućuje primjena u situacijama kada to nije moguće riješiti pravilima samog sustava.

### Okolišni indikatori i mjere preferencije

Ekspertno znanje u ekspertnim sustavima izražava se veličinama (varijablama) određene vrste. U zaštiti okoliša varijable koje se primjenjuju su okolišni indikatori. Teorija okolišnih indikatora je područje koje se razvija, dajući odgovarajuće podjele okolišnih varijabli koje se primjenjuju u izgradnji ekspertnih sustava. Indikatori se mogu povezivati u tzv. zajedničke (skupne) indikatore. U Patiero-Fernandez et al. (2005) za povezivanje indikatora onečišćenja voda u rudarstvu predlažu se izrazi:

$$I_{A/proiz.zat.var.a.uk.} = I_{sub.} \cdot \sum_{j=N,S,W,M} I_{A,j} (I_{A,Mineral} + I_{A,D} + I_{A,T}) \quad (1)$$

$$P_{voda} = \sum_{i=1}^{15} gw_{voda,i} \cdot \{m_i\} + gw_{voda,pH} \cdot (6 + |6 - pH|) \quad (2)$$

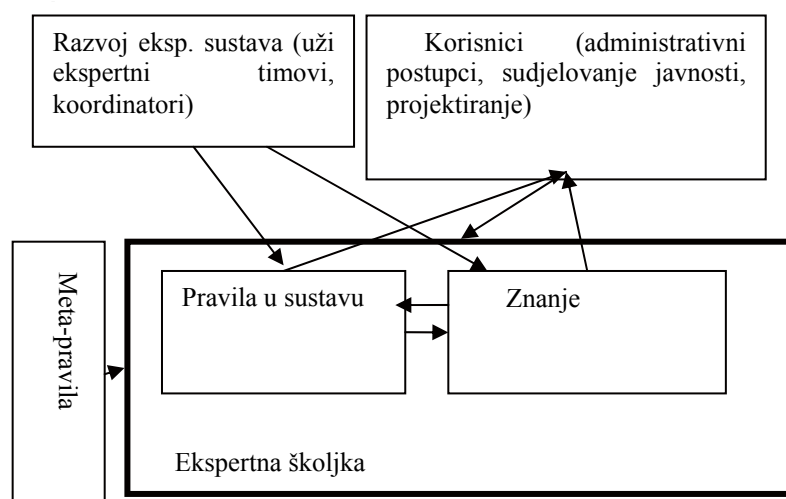
gdje su:  $P_{voda}$ : zbirni indikator onečišćenja vode,  $gw_{voda,pH}$ : indikator kiselosti,  $gw_{voda,i}$ : indikatori onečišćenja voda,  $I_{A/proiz.zat.var.a.uk.}$ : zbirni indikator korištenja zemljišta,  $I_{sub.}$ : indikator u ovisnosti od eksploatacije (podzemno/površinsko rudarstvo),  $I_{A,j}$ : vrsta korištenog zemljišta,  $I_{A,Mineral}$ : površina eksploatacije i rekultivacije,  $I_{A,T}$ : površina jalovišta,  $I_{A,D}$ : površina otkrivke,  $N$ : skupina indikatora korištenja prirode,  $S$ : skupina indikatora korištenja zemljišta za naselja,  $W$ : skupina indikatora korištenja zemljišta za ostale ekonomske aktivnosti,  $M$ : skupina ostalih indikatora.

X.Zhu et al. (2007) daje sljedeći izraz za povezivanje okolišnih indikatora za sanaciju i rekultivaciju lokacija obuhvaćenih rudarskim aktivnostima:

$$f(x) = (a_1 \times a_2 \times \dots \times a_n)^{1/n}, \quad (3)$$

gdje su:

$f(x)$ : vrijednost indikatora sanacije i rekultivacije,  $a_1 \dots a_n$ : indikatori sanacije i rekultivacije.



Slika 1. Ekspertni sustav s dijelovima i interakcijama

Figure 1. Expert system with parts and interactions

Okolišni indikatori su ujedno i preferencije za odlučivanje. Povezivanjem indikatora izrazima (1), (2) i (3), određuje im se već odgovarajuća mjera preferencije koja je potrebna za odlučivanje u ekspertnim sustavima. Kao zajednička mjera preferencije (MP) najčešće se definira korisnost (eng. utility), koja se prikazuje kao funkcija.

Za korisnost kao funkciju postavlja se aksiom (Russel & Norvig, 2010):

Ako su A i B preferencije za dvije varijable i ako je  $A > B$  i  $B > C$ , onda vrijedi  $A > C$ . Ako je  $A > B$  i  $B > C$ , onda vrijedi  $A > C$ , gdje su  $U(A)$  i  $U(B)$  mjere preferencije za varijable A i B. Na temelju tog aksioma razvijaju se ostale relacije za matematičku obradu

mjera preferencije koje nisu uvijek (ili nisu u pravilu) linearne funkcije. Uz korisnost, u novijim pristupima u odlučivanju u zaštiti okoliša sve se više primjenjuju i druge mjere preferencije (dobrobit, blagostanje), koje se i odgovarajuće matematički definiraju (Dasgupta, 2001).

Mjere preferencije (korisnost, kao i ostale) u ekspertnim sustavima mogu se prikazati različitim ljestvicama, o kojima je moguće govoriti kao o dva osnovna tipa ljestvica; ordinalnim (nominalnim) i kardinalnim ljestvicama (tablica 1.). Kardinalne ljestvice koriste konvencionalan matematički aparat i statističke procedure, dok je operacije kod ordinalnih potrebno odgovarajuće (konsenzualno) definirati. Izuzetak je neizravna logika, čije je aksiomatski aparat dobro razvijen konvencionalnom matematikom.

**Tablica 1.** Ljestvice mjera preferencije koje se koriste u ekspertnim sustavima

**Table 1.** The scales of measures of preferences used in expert systems

LJESTVICA	OSOBINE LJESTVICE	DOPUSTIVE MATEMATIČKE I LOGIČKE OPERACIJE	DOPUSTIVA STATISTIČKA PROCEDURA VREDNOVANJA REZULTATA
Nominalna	Podjela prema klasifikaciji	Jednostavna supstitucija ili konsenzualno ekspertno definiranje operacija (simbolička logika i aritmetika)	Informacijska statistika
Ordinalna	Podjela u terminima važnosti	Relacije ekvivalencije s drugim monotonim rastućim ili padajućim funkcijama ili transformacije članova za kvantifikaciju u kardinalnu ljestvicu	Neparametarska statistika
Intervalna	Podjela u terminima jednakih razlika	Linearne transformacije članova ljestvice	Parametarska statistika
Racionalna (omjerna)	Podjela u terminima jednakih omjera	Množenje i djeljenje s konstantama ili s drugim vrijednostima iz ljestvice	Parametarska statistika
Lingvistička na temelju neizrazitih skupova	Podjela prema pripadajućim područjima i funkcijama udjela	Neizrazita aritmetika i neizrazita logika	Neizrazita statistika

U tablici 1. su također date statističke procedure vrednovanja rezultata, a primjer statističke procedure izbora lokacije odlagališta otpada ordinalnom ljestvicom prikazan je u *Rumenjak (2006)*.

Za transformaciju ordinalne u kardinalnu ljestvicu mogu se koristiti nelinearne transformacije, kao npr.

$$T = \frac{i - 1/2}{M}, \quad i = 1, \dots, M, \quad (4)$$

gdje je  $M$  broj članova ljestvice.

Osim ljestvica mjera preferencije, u ekspertnim sustavima moguća je i primjena ekonomskih mjera preferencije (novčana vrijednost okoliša. Takve mjere preferencije mogu biti od važnosti za povezivanje s poslovnim odlučivanjem. Izbor odluke u ekspertnom sustavu prikazan je u tablici 2.

### Razvoj ekspertnih sustava za zaštitu okoliš u rudarstvu u Hrvatskoj

Od 2000. nadalje, donošenjem zakonskih propisa kojima se je bolje regulirao način provedbe procjene utjecaja na okoliš, u Hrvatskoj se češće koriste ekspertne metode prihvatljivosti za okoliš. Daljnji razvoj propisa iz zaštite okoliša i usuglašavanje sa zakonodavstvom EU-a, proširili su potrebu za takvim pristupom. Te metode, od kojih se za potrebe procjene utjecaja na okoliš pojavio relativno veliki broj, mogu se nazvati i ekspertnim sustavima, iako često nemaju sve osobine takvih sustava. Za primjenu u rudarstvu prepoznato je nekoliko metoda (Rumenjak, 2007). Sve sadrže različite mjere preferencije (ordinalna ili razmjerna ljestvica, tablica 1.) te definiraju način izbora varijanti (agregacije rezultata).

**Tablica 2.** Izbor odluke kroz vrednovanje mjera preferencije okolišnih varijabli,  $U_{ij}U_{ij}$ , s kriterijima  $C_j$  i varijantama  $a_i$

**Table 2.** Choice of decision through evaluation of measures of preference for environmental indicator  $U_{ij}U_{ij}$ , with criteria  $C_j$  and alternatives  $a_i$

varijante	Kriteriji				
	$C_1$	.....	$C_j$	.....	$C_n$
$a_1$	.....	.....	.....	.....	.....
....	.....	.....	.....	.....	.....
$a_i$	.....	.....	$U_{ij}$	.....	.....
....	.....	.....	.....	.....	.....
$a_n$	.....	.....	.....	.....	.....

Metoda ranjivosti s matricom interakcija (Marušič, 1999) u primjeni je u susjednoj Sloveniji, iz koje je potekla te je pronašla primjenu u određenom broju postupaka procjena utjecaja na okoliš za eksploataciju mineralnih sirovina u Hrvatskoj. Definirana je ordinalnom ljestvicom od 1 do 5. Broj indikatora koji se primjenjuje varira, ali najčešće se kreće oko 20. Agregacija rezultata se može provoditi preko glavnih dijelova tehnološkog procesa i /ili kriterija.

Metoda oblikovanja i prenamjene predložena je 2005. (Krasić, 2005), posebno za rudarstvo. Definira 40 indikatora, s ordinalnim ili racionalnim ljestvicama od 1 do 3, podijeljenih u tri osnovne skupine: prirodni, ekonomsko-operativni i okolišni. Do izbora varijante eksploatacije dolazi se usporedbom, kao i u metodi ranjivosti, s prethodno definiranim ljestvicom rezultata.

Također su u primjeni neke nespécializirane metode (sustavi) multikriterijalne analize s ordinalnim/omjernim ljestvicama (često u rasponu od 1 do 10), koje se kreiraju u zavisnosti od slučaja u primjeni. Glavni problemi kod takvih metoda su loše definirane ljestvice i nedostatak potrebnog konsenzusa oko definiranja ljestvica i indikatora, što rezultira u niskoj vjerodostojnosti takvih metoda.

Izbor oko 30 indikatora temeljem teorije indikatora održivog razvika, koji su prikladni za primjenu u zaštiti okoliša u rudarstvu daje se u Möllerherm et al. (2005).

Ekspertni sustav brze matrične metode (RIAM) (Pastakia, 1998) nije među onim sustavima koji su posebno namijenjeni za korištenje u zaštiti okoliša u rudarstvu, ali je razmatran i predložen u varijanti neizrazite logike (Rumenjak, 2004). To je veoma osjetljiva višeljestvica metoda, koja istovremeno koristi 5 različitih ljestvica mjera preferencije te široki spektar indikatora održivog razvika. Zbog svoje osjetljivosti prikladna je za svaki kriterij koji dolazi u obzir u zaštiti okoliša. Agregacija se kod ove metode provodi na drugačiji način od prethodno navedenih metoda, usporedbom frekvencija područja rezultata za varijante odlučivanja.

### Ekspertni sustavi s neizrazitom logikom

Neizrazita logika (eng. fuzzy logic) je logička i matematička disciplina koja se u svojim operacijama služi neizrazitim skupovima. Neizrazite skupove karakterizira funkcija udjela ( $\mu$ ), tj. pripadnosti određenom skupu, koja je  $\leq 1$ .

Na temelju neizrazitih skupova definiraju se lingvističke varijable, koje povezuju lingvistička svojstva (kroz koje se izražava ekspertno znanje) s funkcijama udjela neizrazitih skupova. Lingvistička varijabla je, kao skup, i neizraziti broj, na koji je moguće primijeniti odgovarajuće definirane matematičke operacije.

Svojstva ili preferencije koja lingvističke varijable (LV), kao mjere preferencije, opisuju u ekspertnim sustavima, mogu biti različita. Osim prihvatljivosti za okoliš, moguće je definirati i povoljnost i osjetljivost (svojstva posebno primjenljiva za prirodu). U podsustavima eksper-

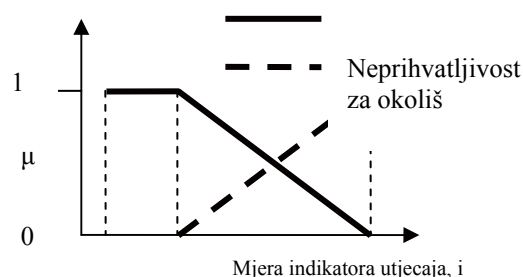
tnih sustava moguće je koristiti i druge posebne varijable, npr. intenzitet različitih utjecaja, fleksibilnost tehnoloških rješenja itd., koje su najčešće dio nekog podsustava u ekspertnom sustavu (Rumenjak, 2009).

Razvijena lingvistička varijabla, za indikator okoliša za koji se određuje prihvatljivost za okoliš (Rumenjak, 2007), prikazana je na slici 2.

Na lingvističkim varijablama, kao neizrazitim skupovima, moguće je definirati odgovarajuće podskupove (particije), koje se može iskoristiti u daljnoj razradi ekspertnog sustava. Particijama LV proširuje se dalje lingvistička ljestvica, koja je inače zadane s 2 temeljne particije: prihvatljivost i neprihvatljivost za okoliš.

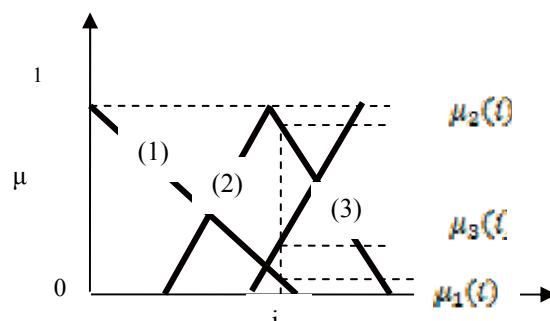
### Izražavanje neizvjesnosti u neizrazitoj logici

U neizrazitoj logici neizvjesnost se izražava konceptom neizrazitosti, odnosno funkcijama udjela neizrazitih skupova.



Slika 2. Razvijena lingvistička varijabla prihvatljivost za okoliš s dvije particije - prihvatljivost i neprihvatljivost za okoliš

Figure 2. Developed linguistic variables acceptability for environment with two partitions- acceptability and non- acceptability for environment



Slika 3. Način prikazivanja neizvjesnosti za indikator okoliša (i) u lingvističkoj varijabli povoljnosti za okoliš s tri particije (podjele) neizrazitog skupa (1), (2) i (3)

Figure 3. Presenting of uncertainty for environmental indicator (i) in linguistic variable favourable for environment with three partitions (1), (2) i (3)

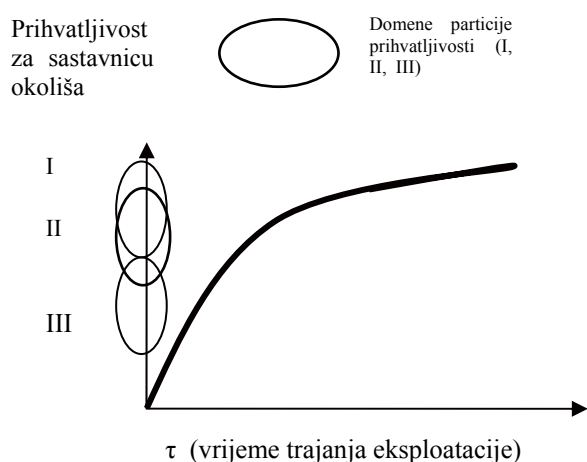
Način izražavanja neizvjesnosti preko neizrazitih skupova prikazan je na sl. 3., za lingvističku varijablu povoljnosti za okoliš (Rumenjak, 2007), s prikazom različitih vrijednosti funkcija udjela  $\mu$  za istu vrijednost indikatora i:

Mjera preferencije (MP) u lingvističkoj varijabla prikazana na sl. 2 i 3 prikazuje se funkcijom udjela i položaj-

jem na ljestvici mjere preferencije (tzv. položajna ljestvica), najčešće u zatvorenom intervalu  $[0,1]$ .

### Nelinearnost

Nelinearnost je značajka pojava i procesa u okolišu (Pravdić, 2008.), koji su često nelinearni, u dinamičkom i statičkom značenju. Važno je napomenuti da nelinearnost ima podjednaku važnost i za fazu odlučivanja kod izbora varijanti, kao i za monitoring utjecaja kod eksploatacije, a posebno u fazi sanacije rudarskih radova, (Rumenjak et al, 2008). Nelinearnost se u neizrazitoj logici prikazuje preko gustoće preklapanja particija lingvističkih varijabli (Ross, 1995), slika.4.



**Slika 4.** Aproximacija nelinearnosti na funkciji prihvatljivosti trajanja eksploatacije za okoliš s tri particije LV preklapanjem neizrazitih podskupova – particija

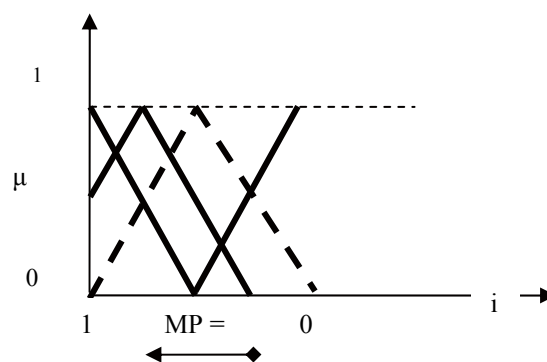
**Figure 4.** Approximation of non-linearity applied on function of acceptability for environment with three partitions overlapped on the axis of the function

Opravdano je stoga pretpostaviti da funkcija prihvatljivosti trajanja eksploatacije, u zavisnosti od vremena eksploatacije, ima oblik prikazan na slici. 4. Aproximacija nelinearnosti ove funkcije lingvističkim varijablama može se provesti lingvističkom varijablom s tri ili više particija, koje se odgovarajuće preklapaju u zavisnosti od karakteristika nelinearne funkcije. Particije mogu biti različito definirano trajanje eksploatacije, kao što je to prikazano u tablici 3.

### Primjer ekspertnog sustava s lingvističkim varijablama za primjenu u rudarstvu

Dijelovi ekspertnog sustava, koji se temelje na konstrukciji lingvističkih varijabli (LV) prema slici.2 prikazani su na primjeru “metoda prenamjene i preoblikovanja”, tablica 3. Sustav koji je ovdje prikazan, dobiven je

Primjer nelinearnosti u ekspertnim sustavima u rudarstvu je važno pitanje prihvatljivosti trajanja eksploatacije na površinskim kopovima, koje se često postavlja u administrativnim postupcima kao što je procjena utjecaja na okoliš. U nekim izvorima ističe se da je duža eksploatacija neprihvatljiva za okoliš (Craig et al. 2011), a to je često i stav javnosti u procjenama utjecaja na okoliš i administracije, koja takvu percepciju dužine trajanja eksploatacije koristi kao ograničavajući faktor za odobravanje eksploatacije. Međutim, teorijska razmatranja pitanja „blagostanja“, kao mjere preferencije za okoliš, navode da je duže trajanje bilo koje aktivnosti s obzirom na korištenje resursa u okolišu, prihvatljivije za okoliš (Dasgupta, 2001).



**Slika 5.** Podjela lingvističke varijable prihvatljivosti trajanja eksploatacije s obzirom na nelinearnost funkcije prihvatljivosti na četiri particije, s položajnom ljestvicom mjera preferencije MP

**Figure 5.** Division of linguistic variable - duration of exploitation, considering non-linearity of function with four partitions and positional scale MP

transformacijom ordinalne ljestvice mjera preferencije polazne metode u kardinalnu ljestvicu, primjenom nelinearne transformacije preko izraza (4) i sadrži okolišne indikatore prenamjene prostora površinskog kopa. Kao okolišni indikator, u sustav je uključeno vrijeme trajanja eksploatacije.

Značajka primjera prikazanog u tablici 3. je ta što je on dio šireg ekspertnog podsustava, što je u ovom slučaju vidljivo iz broja članova kardinalne ljestvice ( $M=20$ ), koji predstavljaju broj svih članova podsustava. Aproximacija particija lingvističkih varijabli je provedena linearnim (trokutastim) funkcijama udjela.

Na temelju ove metode, a u skladu s konceptom nelinearnosti prikazanom na slici 4., moguće je provesti daljnju podjelu (particiju) lingvističke varijable modelom prikazanom na slici 5., povećavajući broj particija (Cox, 1999).



**Tablica 3.** Lingvističke varijable prihvatljivosti za okoliš, s pripadnim ljestvicama mjera preferencije (MP) i funkcijama udjela kao dio šireg ekspertnog sustava

**Table 3.** Linguistic variables acceptability for environment, with appropriate scales of measure of preference (MP) and membership values as a part of expert system

Lingvističke varijable	Opisna (nominalna) ljestvica	Ordinalne vrijednosti po metodi	Kardinalna ljestvica M=20	Funkcije udjela	
				Particija prihvatljivosti	Particija neprihvatljivosti
1. 1. Društveni značaj prenamjene	velik, ekskluzivni sadržaji;	- 4	- 0.18	1	0
	relativno velik, vrlo vrijedni sadržaji;	- 3	- 0.13	0.7	0.4
	mali, manje korisni sadržaji;	- 2	- 0.08	0.4	0.7
	nikakav, nema posebne namjene	- 1	- 0.03	0.2	0.9
1.2. Prilagodljivost projektne rješenja oblikovanog prostora budućoj namjeni	izvršna, u potpunosti prilagodljivo;	- 4	- 0.18	1	0
	prihvatljiva, prilagodljivo s malim dodatnim zahvatima;	- 3	- 0.13	0.7	0.4
	loša, prilagodljivo s velikim dodatnim zahvatima;	- 2	- 0.08	0.4	0.7
	neprihvatljiva, nema posebne namjene ili prilagodba u potpunosti mijenja projektne rješenja.	- 1	- 0.03	0.2	0.9
Trajanje eksploatacije	preko 30 god.	- 4	- 0.18	1	0
	do 30 god.	- 3	- 0.13	0.7	0.4
	do 20 god.	- 2	- 0.08	0.4	0.7
	do 10 god.	- 1	- 0.03	0.2	0.9
Utjecaj buduće namjene na okoliš	povoljan, ne narušava ekosustav;	- 4	- 0.18	1	0
	uvjetno povoljan, povremeno može utjecati na ekosustav;	- 3	- 0.13	0.7	0.4
	nepovoljan, stalno može utjecati na ekosustav;	- 2	- 0.08	0.4	0.7
	izrazito nepovoljan, nema posebne namjene ili se izravno utječe na ekosustav.	- 1	- 0.03	0.2	0.9

### Agregacija rezultata

Način na koji se dolazi do mjera preferencije te sam izbor varijanti ili odlučivanje u ekspertnim sustavima naziva se još i agregacijom. Agregacija u ekspertnim sustavima odvija se prema pravilima, koja su dio samog sustava, a ponekad i određenih pravila izvan sustava (meta-pravila). Agregacija ovisi o obrascu na kojem se ekspertni sustav postavlja, npr. utilitarna (poslovni sustavi) ili neutilitarna agregacija (zaštita okoliša).

„Trade-off“ agregacija je određeni kompromis između utilitarne i neutilitarne koncepcije odlučivanja. Za ekspertne sustave koji koriste neizrazitu skupove (brojeve) moraju se primijeniti pravila neizrazite aritmetike.

Opći izraz za proračun neizrazitom aritmetikom primjenom ekstenzijskog principa na zbroj mjera preferen-

cije koji se prikazuju neizrazitim brojevima, primjenom

$$\mu(f(x)) = \sup\{\min \mu(x_{1..n}) \mid f(x) = x_1 + x_2 + \dots + x_n\} \quad (5)$$

gdje je  $\mu(f(x))$ : funkcija udjela za rezultat agregacije koji je neizraziti skup,  $x_n$ : član neizrazitog skupa mjera preferencije  $\tilde{X}_n$ ,  $\mu(x_n)$ : funkcija udjela člana skupa preferencije u terminima neizrazite logike, **sup**: gornja najmanja granica (< max za kontinuirane funkcije).

Agregacija približnim zaključivanjem u neizrazitoj logici daje mogućnost primjene logičkih pravila u izboru odluke. Opći slučaj približnog zaključivanja (eng. *approximate reasoning*), koje se služi neizrazitim skupovima može se prikazati kao proces koji se sastoji od kompozicije pravila i operatora te dekompozicije rezultata zaključivanja do ekvivalentne vrijednosti (Cox, 1999):

$$\mu_c(y) \leftarrow \bigwedge_{i=1}^n \text{comp}(\mu_{P_i}[x] \bullet \mu_{P_i}[x, y]) \quad (6)$$

$$\mathfrak{R} \leftarrow \text{decomp}(C)$$

gdje je član:  $\text{comp}(\mu_{P_i}[x] \bullet \mu_{P_i}[x, y])$  izraz za

kompoziciju unutar pravila,  $\bigwedge_{i=1}^n$ ; agregacija rezultata,  $\mathfrak{R} \leftarrow \text{decomp}(C)$ ; dekompozicija (defazifikacija, engl. defuzzification) do ekvivalentne vrijednosti neizrazitog skupa.

Odluka o izabranoj varijanti u neizrazitoj logici donosi se temeljem funkcije odlučivanja:

$$\mu_D(a^*) = \left\{ \max_{a \in A} \left[ \min \{ \mu_{C_1}(a), \mu_{C_2}(a), \dots, \mu_{C_r}(a) \} \right] \right\} \quad (7)$$

$$D = \bigcap_{j=1}^r C_j$$

gdje su  $\{ \mu_{C_1}(a), \mu_{C_2}(a), \dots, \mu_{C_r}(a) \}$ : pojedine vrijednosti udjela kriterija po varijantama,  $\mu_D(a^*)$ : funkcija udjela izabrane varijante koja se još naziva funkcijom odlučivanja,  $C_j$ : kriterij odlučivanja,  $\mu_{C_j}$ : funkcija udjela varijante po kriteriju dobivena iz skupa kriterija, tj. njihovih udjela,  $D$ : model odlučivanja. Rezultat se prikazuje funkcijom udjela i položajnom ljestvicom.

Razvijeni model (7) temeljit će se utilitarnoj ili neutilitarnom obrascu odlučivanja, u ovisnosti od matematičke definicije vrednovanja mjera preferencije po kriteriju odlučivanja,  $C_j$  (Rumenjak, 2009).

## Zaključak

Ekspertni sustavi za izbor odluka zahtijevaju se zbog složenosti problematike odlučivanja u zaštiti okoliša, koja se mora povezati s poslovnim odlučivanjem. Ekspertni sustavi grade se temeljem indikatora i mjera preferencije. Indikatori su baza ekspertnog znanja, dok se odlučivanje provodi temeljem mjera preferencije, koje se definiraju kao funkcije okolišnih indikatora. U procjeni utjecaj na okoliš već je našao primjenu jedan broj ekspertnih sustava, dok su neki samo predloženi. Neizrazita logika i lingvističke varijable, na kojoj se ekspertni sustavi mogu temeljiti, u informacijskom, preferencijalnom te u pogledu postavljanja pravila i agregacije rezultata ispunjavaju sve zahtjeve ekspertnih sustava u zaštiti okoliša.

## Literatura

Buckley J.J., Eslami E. (2002): An Introduction to Fuzzy Logic and Fuzzy Sets, Physica-Verlag, pp.63, Heidelberg

Cox E. (1999): The Fuzzy Systems Handbook, AP Professional, pp 290 (1), pp. 682 (2), San Diego

Craig J.R., Vaughan D.J., Skinner B.J. (2011): Earth Resources and the Environment, Prentice-Hall, pp. 82, Boston

Dasgupta, P. (2001): Human Well-Being and the Natural Environment, Oxford University Press, Oxford, pp. 91 (1), pp.240(2)

Jackson, P. (1998): Introduction to Expert Systems, Addison-Wesley, pp. 2, Harlow

Krasić D. (2005): Doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb

Marušić J. (1999): Okoljevarstvene presoje v okviru prostorskog načrtovanja na ravni občine - Modeli v prostorskem načrtovanju, 3. zvezak, Geoinformacijski centar R. Slovenije, str.10, Ljubljana

Möllerherm S., Martens P.N. Patiero-Fernandez J.B. (2005): Development of a Sustainability Evaluation System, Second International Conference Sustainable Development Indicators in the Mineral Industry - SDIMI 2005, 18-20 May, P.419, Aachen

Pastakia C.M.R (1998): The Rapid Impact Assessment Matrix (RIAM)- A New Tool for Environmental Impact Assessment, u Jensen K. ed., Environmental Impact Assessment - Using the Rapid Impact Assessment Matrix (RIAM), Olsen&Olsen, 8 pp, Fredensburg

Patiero-Fernandez J.B., Martens P.N., Möllerhaim S. (2005): Development of Environmental Indicators for the Raw Mineral Industry, Second International Conference Sustainable Development Indicators in the Mineral Industry - SDIMI 2005, 18-20 May, P.731, Aachen

Pravdić V. (2008.): Review of the book Graham Harris: Seeking Sustainability in an Age of Complexity, *Kem. ind.* 57 (5) 277-279, Zagreb

Ross, T.J. (1995). Fuzzy Logic for Engineering Applications, McGraw-Hill, pp. 267, New York

Rumenjak D.(2009): Doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu

Rumenjak D. (2006), Metodologija izbora varijanti u procjeni utjecaja na okoliš i cost-benefit analizi, IX. Međunarodni Simpozij gospodarstva otpadom. 15-18 November, P.755, Zagreb

Rumenjak D., Rajković D., Salopek B. (2007): Some Possibilities for Construction of Linguistic Variables for Sustainable Decision Making, 3rd International Conference on Sustainable Development Indicators in the Mineral Industry - SDIMI 2007, 17-20 June, P. 211, Milos Island

Rumenjak, D. D. Rajković and B. Salopek (2008), Some solutions for fuzzy approximate reasoning in sustainable development decision-making and monitoring phase using environmental indicators, 1<sup>st</sup> International Conference on Indicators for Land Rehabilitation and Sustainable Development, 22-23 October, P. 190, Beijing

Rumenjak D., Salopek B, Rajković D. (2004): Change of Decision Making Principle in Environmental Impact Assessment Applied on Screening Matrices, International Conference on Advances in Mineral Resources and Environmental Geotechnology (AMIREG), 7-9 June, P.751, Chania

Russel S., Norvig P. (2010): Artificial Intelligence - A Modern Approach, Prentice Hall, pp. 613, Boston

X.Zhu, D.Li, Komnistas K. (2007): Development of an indicator based revegetation SDSS in areas affected by mining activities, 3rd International Conference on Sustainable Development Indicators in the Mineral Industry - SDIMI 2007, 17-20 June, P.267, Milos Island,

## EXPERT SYSTEMS FOR ENVIRONMENTAL PROTECTION IN MINING

Expert systems are used in various activities with the main goal of decision-making in intelligent and transparent way. In business decision-making, such systems are directed to pure operational and economical decisions. In environmental protection they have to accept the specificity of business sector for which they have been intended, but also use environmental reasons and evaluate them differently than economic.

The expert systems connect rules and knowledge as it is shown for simple case appropriate for mining, in Fig.1. The knowledge in expert systems for environmental protection are often expressed by values known as environmental indicators, of which some examples for mining are given by expressions containing appropriate aggregation formulas (1), (2) and (3). To use such indicators in evaluation procedures, the measure of preferences (MP) must be joined to them, of which the most common is utility. The others MPs are possible (welfare, well-being), but are mostly still under development. For practical purposes, MPs are represented by scales of type shown in Table 1. The evaluation procedures (decision-making) with such scales are

shown in Table 2. Two basic types of scale are recognizable, ordinal and cardinal, and transformation from ordinal to cardinal scales is given by expression (4).

In Croatia some expert systems for mining are already in use. Method of Vulnerability of Environment with Matrix of Interactions is relatively widespread in Croatia and in neighbouring Slovenia, where it originated. It defines scales from 1 to 5. The number of indicators used is usually about 20 but could vary. The aggregation could be performed either over main parts of technological operations and/or over criteria. Method of Reshaping and Reclamation (MRR), designed especially for mining is

proposed in 2005. It defines 40 indicators in ordinal/ratio ranges from 1 to 3 or sometimes 5, divided in three main groups: natural, economical-technical and ecological. The aggregation is similarly done as in previous method, with predefined range values. Rapid Impact Assessment Matrix or RIAM method is not yet amongst those used in mineral industry, but its use has already been considered and recommended as that suitable for expert systems for mining. The recent development of expert systems for mining is the use of fuzzy variables (linguistic variable or LV) of which general one is given in Fig. 2, representing properite of acceptability for environment. The LVs are connecting together indicators and measures of preferences in the same variable. The well known feature of LVs is representation of uncertainty by more partitions of linguistic variables, Fig.3. The second is non-linearity, Fig.4, which is characteristics of many processes in nature and environment, and is achieved by overlapping of partitions of such variables. The case of duration of exploitation is given for non-linearity by the example of LV in Fig.5. The importance of duration of exploitation as environmental variable and its course of influence is still under debate in literature and administrative procedures like environmental impact assessment. Here, as result of such debates, non-linearity for the variable is supposed-

The variables for the system proposed on those considerations given in Table 3, are Social significance of reshaping and reclamation according to future use, Flexibility of project solutions of reclamation to future uses on the location, Duration of exploitation, and Impacts of future uses on environment. They are originally from MRR method but here adapted to fuzzy logic. The aggregation of the results of systems based on fuzzy logic could be provided in utilitarian way, using expression (5) or non-utilitarian way more suitable for environmental decision-making, using (6) and (7). Both approaches could be combined to achieve the desirable effects for the system.