

Pravidlá pre fuzzy systém modelujúci pevnosť horninového masívu

Edita Lazarová¹

Rules for the fuzzy system modelling the rock mass strength

The tunnelling machine acts as a very complex system in the interaction with rock masses. The identification of significant properties provides a prediction of the excavation performance in complicated geological conditions, which forms the aim of presented article. The excavation performance of the tunnelling machine affects the cost effectiveness of tunnel excavation in a very special manner. As the field of geotechnics often emerges with a certain ambiguity and vagueness, we have decided to establish the fuzzy sets and fuzzy logics in the problem solution.

Key words: modelling of complex systems, knowledge database, production rules, fuzzy system computer monitoring system, TBM, rock mass properties

Úvod

Príspevok prezentuje výsledky štúdie aplikácie fuzzy metódy na hodnotenie stavu horninového masívu na postupujúcej čelbe. Metóda bola aplikovaná na hodnoty monitorovaných a z nich vypočítaných veličín procesu razenia prieskumnej štólne Branisko, ktorá bola budovaná plnoprofilovým raziacim strojom (PPRS) WIRTH TB-II-330H/M. Dôvody pre použitie fuzzy metódy boli nasledovné:

- Fuzzy množiny, na rozdiel od klasických množín, uvažujú s určitou príslušnosťou prvku do množiny, to znamená, že fuzzy množiny umožňujú skúmať, či uvažovaný prvok je viac alebo menej typickým reprezentantom množiny. Fuzzy logika je schopná matematicky podchytiť informácie vyjadrené slovné a previesť ich do jazyka, ktorému je počítač schopný porozumieť.
- Popis reality v geotechnike je často vágny a nejednoznačný.
- Horninový masív sa dá charakterizovať ako anizotropný, nelineárny a diskontinuitný.
- Interakcia systému hornina – nástroj je dynamická, neurčitá, zložitá a z toho vyplýva, že je matematicky nepresne popísaná.
- Dlhoročné skúsenosti získané zo štúdia procesu rozpojovania je možné výhodne použiť pri tvorbe produkčných pravidiel.
- Údaje získané z monitorovania razenia tunelového diela predstavovali obrovský súbor dát, využitý pri sledovaní vplyvu horninového prostredia, parametrov režimu razenia a geometrických charakteristík rozpojovacieho nástroja na hodnoty skúmaných charakteristík procesu rozpojovania. Inverzne z nich boli matematickými postupmi odvodené modelové rovnice interakcie rozpojovacej hlavy raziaceho stroja s horninovým prostredím (modelová pevnosť v tlaku, modelová pevnosť v šmyku a modelový RQD koeficient), (Krúpa, 1998). Všetky poznatky z analýzy vytvárajú znalostnú bázu, využiteľnú vo fuzzy modelovanom systéme.

Poznatky o rozpojovaní plnoprofilovými raziacími strojmi implementované do fuzzy pravidiel

Rozpojovacia hlava PPRS je osadená diskovými valivými dlátami, ktoré fungujú ako indenty a rozpojujú horninu. Ich počet je daný veľkosťou a konštrukciou rozpojovacej hlavy. Radiálna vzdialenosť medzi dráhami susedných diskov s postačujúca pre rozpojenie horniny je 50 – 70 mm. Zároveň umožňuje vznik šmykových napätí medzi diskovými dráhami a simultánne pôsobenie diskov na čelbu, čo zaručuje efektívne rozpojovanie horniny. Rozsah aplikovateľnej prítlačnej sily (prítlaku) rozpojovacej hlavy F [kN] musí zabezpečiť pre všetky horniny, ktoré sa nachádzajú v trase razenia, splnenie tejto podmienky. Vznik šmykových napätí podmieňuje veľkosť kontaktného tlaku disku na horninu, teda tvar, veľkosť kontaktnej plochy disku s horninou S a veľkosť prítlačnej sily F . Pri zvyšovaní normálovej sily pôsobiacej na disk (jej veľkosť určuje pre daný PPRS prítlak) sa zväčšuje hĺbka zatlačenia disku do horniny a úmerne rastie aj veľkosť dotykovej plochy. Rozpojenie horniny môže nastať pri rôznych hodnotách prítlaku aj pre tú istú horninu, vždy keď platí

$$\frac{F}{S} > \sigma,$$

¹ Ing. Edita Lazarová, PhD., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice, lazarova@saske.sk
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 13. 12. 2006)

kde σ charakterizuje pevnosť horniny. Malé prítlaky a malé kontaktné plochy ale nevytvárajú efekt simultánneho pôsobenia diskov, t.j. vyštepovanie väčších kusov horniny medzi dráhami diskov. Identifikátorom simultánneho pôsobenia diskov (existencie šmykových napätí) je merná objemová práca rozpojovania. Pri efektívnom rozpojovaní horniny dosahuje minimálnu hodnotu. Energetické teórie rozpojovania deklarujú, že medzi pevnosťou a mernou objemovou prácou rozpojovania existuje experimentálne potvrdený vzťah len pri minime mernej objemovej práce rozpojovania. Preto je možné porovnávať stanovené hodnoty pevnosti len pri efektívnom rozpojovaní. Všeobecne pre horniny s pevnosťami $\sigma_1 < \sigma_2$ platí, že hĺbka zatlačenia diskov pri tej istej prítlačnej sile je väčšia u hornín s pevnosťou σ_1 , kedy je kontaktná plocha disku väčšia. Situáciu môže skomplikovať rozdielna porušenosť hornín, ktorá všeobecnú formuláciu predchádzajúcej vety môže negovať. Obdobne nejednoznačné závery vzniknú pri štúdiu vzťahu prítlačnej sily a krútiaceho momentu. Teoreticky by mal byť krútiaci moment väčší u horniny s pevnosťou σ_1 , pretože je súčasne väčšia hĺbka zatlačenia. Môže však nastať prípad, že pri pevnej hornine je dosahovaný väčší krútiaci moment pri zodpovedajúcej hodnote prítlačnej sily, ak je táto hornina porušená, a tým je prechodne zvýšená hĺbka zatlačenia. Všetky tieto možnosti boli implementované do fuzzy pravidiel.

Fuzzy pravidlá pre fuzzy systém a ich aplikácia

Navrhnutý fuzzy systém je realizovaný v programovom prostredí MATLAB a využíva Fuzzy Logic Toolbox. Pri jeho návrhu bol dodržaný nasledovný postup:

- definovanie a vytvorenie použitých vstupov a výstupov,
- vytvorenie jazykových premenných,
- vytvorenie pravidiel,
- testovanie systému počas návrhu,
- generovanie výsledného systému,
- verifikácia návrhu systému v praxi.

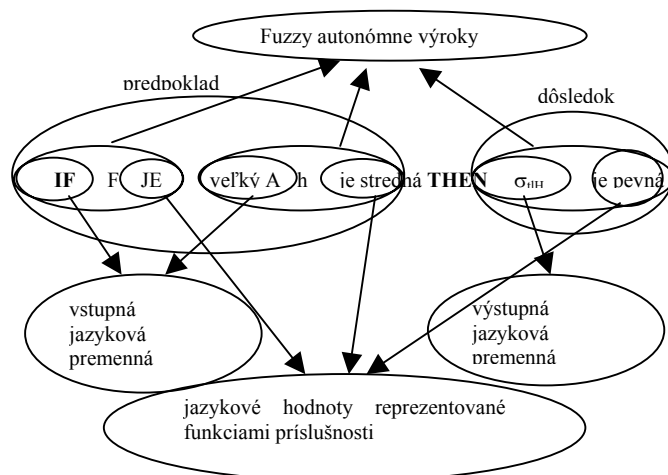
Boli zadefinované 4 vstupné jazykové premenné. Parametre režimu razenia charakterizoval prítlak rozpojovacej hlavy na čelbe F , krútiaci moment hlavy raziaceho stroja M_k a hĺbka zatlačenia disku do horniny h . Porušenosť horniny vyjadroval koeficient RQD (Rock Quality Desintegration).

Jazykovým premenným boli priradené lingvistické hodnoty (napr. h – hĺbka zatlačenia – malá, stredná, veľká, extrémna). Pre každú lingvistickú hodnotu boli definované fuzzy množiny (h – malá – $\langle 1; 1,5; 2,2; 3 \rangle$; h – stredná – $\langle 2; 2,3; 3; 3,3 \rangle$; h – veľká – $\langle 3; 3,3; 3,7; 4 \rangle$; h – extrémne veľká – $\langle 3,7; 4; 4,5; 6 \rangle$). Použité boli trojuholníkové a lichobežníkové tvary fuzzy množín.

Každému prvku bola priradená miera, ktorá vyjadruje jej príslušnosť k fuzzy množine. Stupeň príslušnosti daného prvku v množine bol uvažovaný v intervale $\langle 0, 1 \rangle$. Určuje vlastne stupeň presvedčenia, že daný prvok patrí do fuzzy množiny. Ak je táto škála usporiadaná, potom menšia hodnota bude znamenať, že prvok leží na okraji množiny.

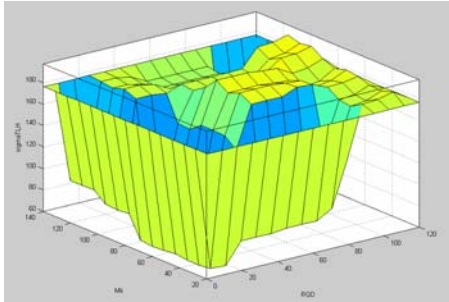
Avšak stanovenie tohto stupňa plynie tiež z konkrétnej situácie. Pri hodnotení aplikovaného režimu na Branisku, je prítlak veľký, ak jeho hodnoty ležia v intervale $\langle 1400; 1700 \rangle$ [kN], avšak pri razení v iných geologických podmienkach a iným raziacim strojom by bolo treba stanoviť iné triedy. Priradovanie stupňa príslušnosti závisí od subjektu, ale aj od kontextu.

Ďalším krokom bolo vytvorenie produkčných pravidiel. Zjednodušená schéma fuzzy pravidla je na obr. 1.



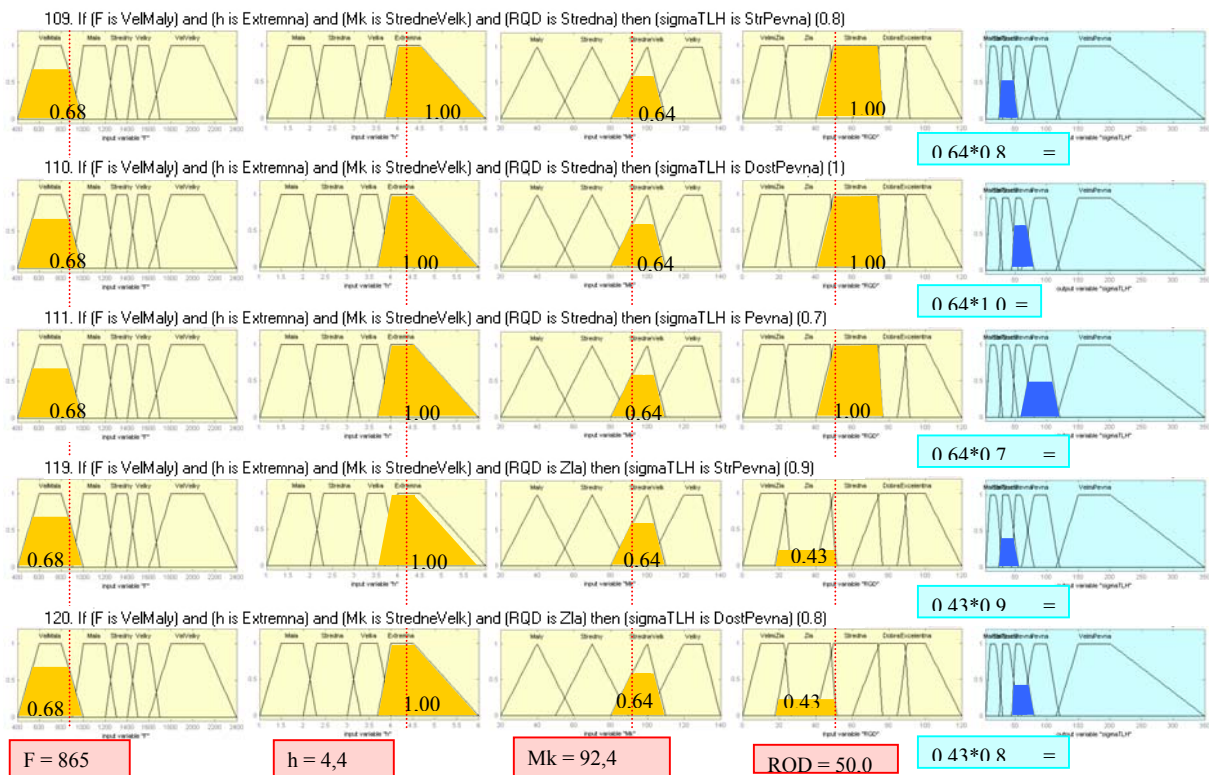
Obr.1. Fuzzy pravidlo.
Fig. 1. Fuzzy rule.

Pravidlá pozostávajú z IF časti - predpoklad (antecedent) a THEN časti - dôsledok (konzekvent). Predpokladová časť sa skladá z tvrdení, ktoré určujú, kedy sa pravidlo aplikuje. Antecedent môže byť zostavený z viacerých fuzzy autonómnych výrokov, ktoré sú navzájom spojené pomocou spojky AND alebo OR. Dôsledková časť pravidla za logickou spojkou THEN je množinou akcií, ktoré sa vykonávajú, keď sa pravidlo aplikuje. Pre vytvorený fuzzy systém bolo zostavených 792 pravidiel. Na obr. 2 je znázornené priestorové zobrazenie pravidiel pre výstupný parameter σ_{IH} a vstupné premenné M_k (krútiaci moment) a RQD koeficient. Vstupné hodnoty pre fuzzy systém predstavovali „ostré údaje“, ktoré boli získané monitorovaním procesu razenia počítačovým systémom, zostrojeným podľa návrhu pracovníkov Ústavu geotechniky a inštalovaným na plnoprofilovom raziacom stroji WIRTH TB-II-330H/M.



Obr. 2. Priestorové zobrazenie pravidiel.
Fig. 2. Three-dimensional representation of rules.

Programové prostriedky počítača umožňovali snímanie údajov s frekvenciou 2,3 s. Tieto číselné hodnoty sa fuzzifikáciou transformovali na fuzzy hodnotu (určenie miery príslušnosti do vstupných fuzzy množín). V ďalšej časti prebehli fuzzy operácie, pri ktorých sa zo vstupných fuzzy hodnôt generujú výstupné hodnoty. Na vyhodnotenie produkčných pravidiel bol použitý Mamdaniho inferenčný mechanizmus. (Žižka, 1997). Schéma tohto mechanizmu s konkrétnymi vstupmi je na obr. 3. Inferenčný mechanizmus v danom prípade vyhodnocoval 5 pravidiel. Pravidlá, pomocou ktorých sa riadi expert, pri riešení problému, nemusia mať kategorickú povahu. Ak je v pravidle určené, že za určitých podmienok je niečo z pravidla viac alebo viac menej splnené, teda ak predpoklad pravidla je splnený len s určitou pravdepodobnosťou, tak aj dôsledok pravidla má len určitú vierohodnosť. Neurčitnosť znalostného systému sa prejavuje v neurčitosti v báze poznatkov a v neurčitosti v báze faktov z dôvodu nepresne odmeraných veličín, subjektívneho vyjadrenia poznatkov expertov – chyby v procesoch rozpoznávania a interpretácie skutočnosti.

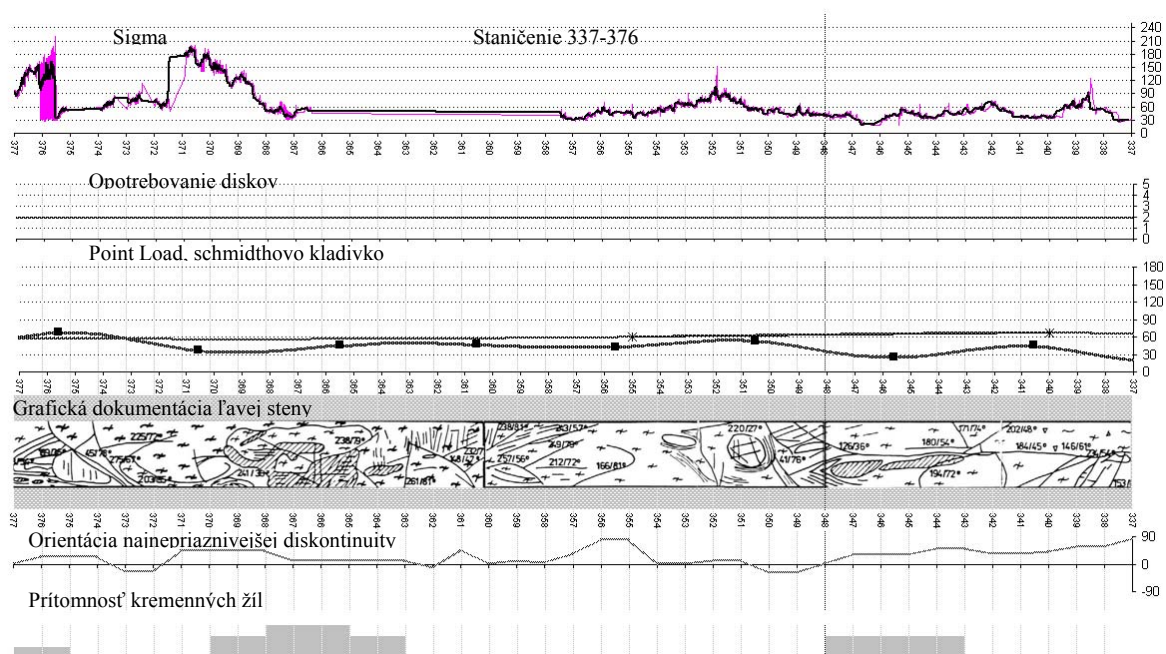


Obr. 3. Výpočet σ_{IH} použitím Mamdaniho inferenčného mechanizmu.
Obr. 3. Calculation of value σ_{IH} by using the Mamdani inference mechanism.

Po vyhodnotení pravidiel inferenčným mechanizmom sa defuzzifikáciou zmenila fuzzy hodnota na reálny údaj. Táto hodnota predstavovala pevnosť horninového masívu σ_{IH} . Programovo bola zatriedená do pevnostnej tabuľky podľa Protodjakonova.

Súčasný stav realizácie

V súčasnosti je fuzzy systém dopĺňaný o parametre opotrebovania diskov a o geologické parametre horninového masívu so zameraním na orientácie a hustoty diskontinuit, prítomnosť kremenných žíl a typ horninového masívu. Na ilustráciu je na obr.4 znázornená dokumentácia k úseku 337-376 m. Hodnota σ_{IH} bola vypočítaná pomocou modelového vzťahu z monitorovaných veličín, ďalšie hodnoty pevnosti boli získané z dokumentácie z inžiniersko-geologického prieskumu. Orientácia diskontinuit a prítomnosť kremeňa bola stanovená z geologických podkladov tunela, pričom bola braná do úvahy najnepriaznivejšia orientácia vzhľadom na smer razenia. Opatrebovanie diskov sa v tomto úseku ešte neprejavilo, keďže stroj pracoval s novými diskami a neprišlo k výmene žiadneho disku.



Obr. 4. Dokumentácia k úseku 337-376 m.
Fig. 4. Documentation for the section 337-376 m.

Záver

Fuzzy systém sa momentálne dopĺňa o ďalšie parametre, testuje sa a pripravuje sa overenie jeho činnosti pomocou programu SIMULINK.

Poznámka: Príspevok vznikol pri riešení grantovej úlohy č.2/6196/26.

Literatúra - References

- [1]. Krúpa, V.: Hypotézy, modely, teórie a ich verifikácie pri plnoprofilovom razení. *Doktorská dizertačná práca, Košice ÚGt SAV, 1998, 251 s.*
- [2]. Žižka, J.: Fuzzy množiny v řízení a regulaci, In.: *Automatizace, roč.40 (1997), č.11, příloha FUZZY REGULÁTOR, P1-P10.*