

# Modeli za procjenu jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti

---

**Briševac, Zlatko; Hrženjak, Petar; Buljan, Renato**

*Source / Izvornik:* **Građevinar, 2016, 68, 19 - 28**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.14256/JCE.1431.2015>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:826113>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-04**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum  
Engineering Repository, University of Zagreb](#)



Primljen / Received: 31.7.2015.  
 Ispravljen / Corrected: 24.12.2015.  
 Prihvaćen / Accepted: 18.1.2016.

Dostupno online / Available online: 10.2.2016.

# Modeli za procjenu jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti

## Autori:



Dr.sc. **Zlatko Briševac**, dipl. ing. rud.  
 Sveučilište u Zagrebu  
 Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
[zlatko.brisevac@rgn.hr](mailto:zlatko.brisevac@rgn.hr)



Doc.dr.sc. **Petar Hrženjak**, dipl. ing. rud.  
 Sveučilište u Zagrebu  
 Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
[petar.hrzenjak@rgn.hr](mailto:petar.hrzenjak@rgn.hr)



Dr.sc. **Renato Buljan**, dipl. ing. geol.  
 Hrvatski geološki institut  
[renato.buljan@hgi-cgs.hr](mailto:renato.buljan@hgi-cgs.hr)

Pregledni rad

**Zlatko Briševac, Petar Hrženjak, Renato Buljan**

## Modeli za procjenu jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti

U ovom radu ukratko je izložen pregled najznačajnijih metoda za procjenu jednoosne tlačne čvrstoće i Yangovog modula elastičnosti intaktnog stijenskog materijala koje su nastale u okviru mnogobrojnih istraživanja. Iznesen je prijedlog podjele metoda prema kojemu se one u osnovi mogu podijeliti na jednostavne i složene metode. Jednostavne metode uključuju različite dijagrame i tablice te primjenu jednadžbi jednostruke regresije, a složene metode uključuju primjene jednadžbi višestruke regresije, modela neizravne logike, neuronskih mreža, evolucijskog programiranja i regresijskog stabla.

### Ključne riječi:

procjena, jednoosna tlačna čvrstoća, Yangov modul elastičnosti, intaktni stijenski materijal

Subject review

**Zlatko Briševac, Petar Hrženjak, Renato Buljan**

## Models for estimating uniaxial compressive strength and elastic modulus

The most significant methods for estimating the uniaxial compressive strength and Young's modulus of intact rock material, formulated in the scope of numerous previous studies, are briefly presented in the paper. The proposal for classification of these methods, according to which they can generally be divided into simple and complex methods, is also presented. Simple methods include various diagrams and tables and the use of simple regression equations, while complex methods comprise the use of multiple regression equations, fuzzy logic models, neural networks, evolutionary programming, and regression trees.

### Key words:

estimation, uniaxial compressive strength, Young's modulus, intact rock material

Übersichtsarbeit

**Zlatko Briševac, Petar Hrženjak, Renato Buljan**

## Modelle zur Bewertung der einachsigen Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls

In dieser Arbeit wird ein Überblick der wichtigsten Methoden zur Bewertung der einachsigen Druckfestigkeit und Young's Elastizitätsmodul, die im Rahmen zahlreicher Untersuchungen entstanden sind, bei intaktem Felsmaterial gegeben. Es wird ein Vorschlag zur Aufteilung in einfache und komplexe Methoden gegeben. Einfache Methoden umfassen verschiedene Diagramme und Tabellen, sowie die Anwendung von Einzelregressionsgleichungen. Komplexe Methoden beziehen sich auf die Anwendung von Mehrfachregressionsgleichungen, Modelle der Fuzzy-Logik, neuronale Netze, evolutionäre Programmierung und Regressionsbäume.

### Schlüsselwörter:

Bewertung, einachsige Druckfestigkeit, Young's Elastizitätsmodul, intaktes Felsmaterial

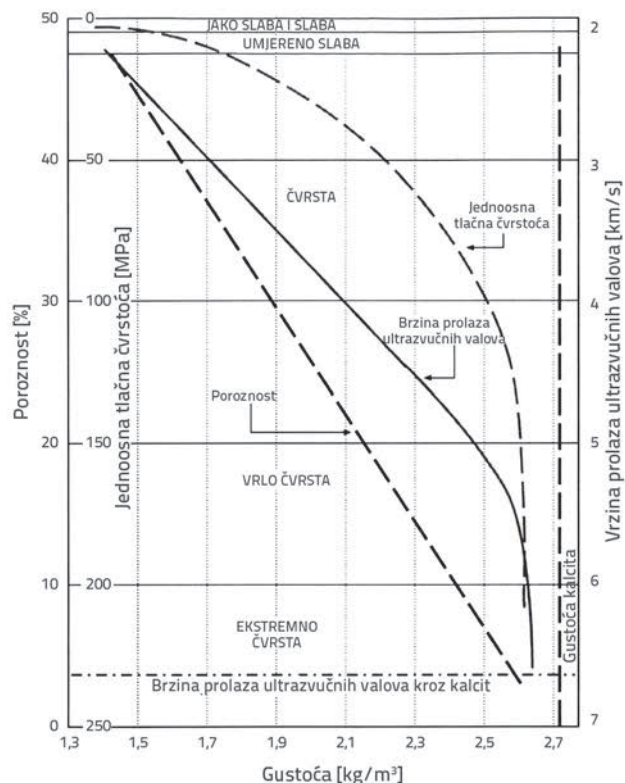
### 1. Uvod

Za potrebe građenja, kao i izvođenja ostalih inženjerskih zahvata u stijenskim masama, provode se različita istraživanja koja uvijek uključuju i provedbu laboratorijskih ispitivanja s ciljem utvrđivanja fizikalno-mehaničkih značajki intaktnog stijenskog materijala. Pri tome je, uz gustoću materijala, jedna od najodređivanijih značajki upravo jednoosna tlačna čvrstoća (UCS), a zatim i Youngov modul elastičnosti (E). Međutim, čest je slučaj da iz takvih sredina nije moguće pripremiti uzorke odgovarajućih dimenzija za provedbu laboratorijskih ispitivanja. Zbog toga se već u samim počecima razvoja mehanike stijena pojavila potreba za utvrđivanjem međuovisnosti između različitih fizikalno-mehaničkih značajki materijala kako bi se mogla provesti procjena jedne značajke na temelju vrijednosti druge. Te međuovisnosti pokazale su se vrlo korisnima u preliminarnim fazama planiranja i projektiranja. Utvrđivanjem mogućnosti procjene vrijednosti UCS i E na temelju vrijednosti ostalih značajki materijala bavili su se mnogi znanstvenici koji su se u početku koristili jednostavnim međuovisnostima, a u novije vrijeme i sve složenijim metodama procjena.

### 2. Modeli procjene

#### 2.1. Tablice i dijagrami

U najjednostavnijem slučaju procjena UCS može se provesti na temelju priručnog identifikacijskog pokusa prema preporučenoj metodi Međunarodnog društva za mehaniku stijena koja je prikazana tablicom 1. Tablica sadrži i korisne nadopune Marinosa i Hoeka [1]. U tom slučaju procjena se provodi pomoću priručnih sredstava (nokat, nož, geološki čekić) i pripadajućih opisa koji su navedeni u tablici 1., a kao pomoć pri procjeni može poslužiti i indeks čvrstoće utvrđen opterećenjem u točki (engl. *Point Load Test*).



Slika 1. Dijagram međuovisnosti UCS s gustoćom poroznosti i brzinom prolaska ultrazvučnih valova za vapnence, [2]

Dijagramski prikaz također je prikladno sredstvo kojim se može poslužiti u situacijama koje traže brzu odluku. Za približnu procjenu vrijednosti UCS vapnenačkog materijala može poslužiti dijagram (slika 1.) međuovisnosti s gustoćom, poroznosti i brzinom prolaska ultrazvučnih valova koju je dao Price [2].

Tablica 1. Procjena vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće priručnim pokusom

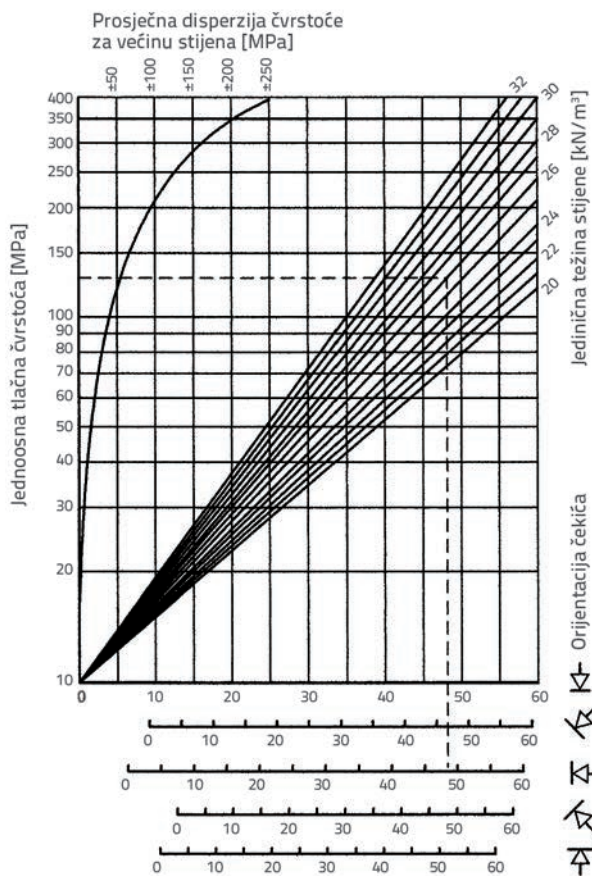
| Stupanj | Opis             | UCS       | $I_{s(50)}$ | Terenska identifikacija                                                                                                     | Primjeri                                                                        |
|---------|------------------|-----------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| R6      | Ekstremno čvrsta | >250      | > 10        | Komad materijala je moguće otkinuti jedino uz pomoć geološkog čekića.                                                       | svježi bazalt, čert, dijabaz, gnajs, granit, kvarc                              |
| R5      | Vrlo čvrsta      | 100 - 200 | 4 - 10      | Za lomljenje materijala potrebno je mnogo udaraca geološkim čekićem.                                                        | anfibolit, pješčenjak, bazalt, gabro, gnajs, tuf, grandiorit, peridotit, riolit |
| R4      | Čvrsta           | 50 - 100  | 2 - 4       | Za lomljenje materijala potrebno je više od jednog udarca geološkim čekićem.                                                | vapnenac, mramor, pješčenjak, škrljavac                                         |
| R3      | Srednje čvrsta   | 25 - 50   | 1 - 2       | Materijal se ne može zagrepsti ili ljuštiti džepnim nožićem, jedino ga je moguće razlomiti jednim udarcem geološkog čekića. | filit, škrljavac, prahovnjak                                                    |
| R2      | Slaba            | 5 - 25    | -           | Materijal se može ljuštiti džepnim nožem, a čvrstim udarcem vrhom geološkog čekića nastaju plitke udubine.                  | kreda, glinjak, lapor, prahovnjak, škrljavac, kamena sol                        |
| R1      | Vrlo slaba       | 1 - 5     | -           | Materijal se mrvi uslijed jakog udarca geološkim čekićem, može ga se ljuštiti džepnim nožem.                                | jako istrošene ili alterirane stijene, škrljavac                                |
| R0      | Ekstremno slaba  | 0,25 - 1  | -           | Materijal se može grepsti i udubljivati noktom.                                                                             | tvrdra ispuna diskontinuiteta                                                   |

UCS – jednoosna tlačna čvrstoća [MPa];  $I_{s(50)}$  – indeks čvrstoće [MPa]

Najpoznatiji pak dijagram (slika 2.) međuovisnosti E s UCS je onaj prema Deeri i Milleru [3].



Slika 2. Dijagram međuovisnost E sa UCS, [3]



Slika 3. Dijagram međuovisnosti između Schmidtove tvrdoće i UCS, [4]

Dijagramom (slika 3.) objavljenim u Millerovoj disertaciji [4] može se obaviti procjena UCS intaktne stijene na temelju Schmidtove tvrdoće (SRH) i jedinične težine stijene bez obzira na vrstu stijene koja se ispituje.

## 2.2. Jednadžbe jednostruke regresije

U jednadžbe jednostruke regresije ubrajaju se utvrđene relacije za procjenu vrijednosti UCS i E kao zavisnih varijabli na osnovi ispitane vrijednosti neke druge značajke koja predstavlja nezavisnu varijablu. Na temelju rezultata ispitivanja fizikalno-mehaničkih značajki intaktnog stijenskog materijala regresijskom analizom su utvrđene različite jednadžbe za procjenu vrijednosti UCS i E. Tako su, na primjer, u tablici 2. prikazane jednadžbe različitih autora za neke vrste stijena kojima se procjenjuje UCS i E na temelju poznate vrijednosti poroznosti.

Tablica 2. Jednadžbe jednostruke regresije s poroznosti

| Jednadžba                                             | Vrsta stijene             | Autori                      |
|-------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| $UCS = 183 - 16,55 n$                                 | granit                    | Turgul i Zarif, 1999. [5]   |
| $UCS = 74,4 e^{-0,04 n}$                              | pješčenjak                | Palchik, 1999. [6]          |
| $E = 10,10 - 0,109 n$                                 | porozne stijene           | Leite i Ferland, 2001. [7]  |
| $UCS = 210,1 e^{-0,821 n}$<br>$E = 37,9 e^{-0,863 n}$ | šejl, glinjak, prahovnjak | Lashkaripour, 2002. [8]     |
| $UCS = 273,1 e^{-0,076 n}$                            | porozna kreda             | Palchik i Hatzor, 2004. [9] |
| $UCS = 195,0 e^{-0,21 n}$                             | pješčenjak                | Tugrul, 2004. [10]          |

UCS - jednoosna tlačna čvrstoća [MPa]; E - modul elastičnosti [GPa]; n - poroznost [%]

Tablica 3. Jednadžbe jednostruke regresije s indeksom čvrstoće

| Jednadžba                                          | Vrsta stijene                                | Autori                              |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------|
| $UCS = 15,3 I_{S(50)} + 16,3$                      | sve stijene                                  | D'Andrea, i ost., 1964. [11]        |
| $UCS = 16 I_{S(50)}$                               | sedimentne stijene                           | Read et all., 1980. [12]            |
| $UCS = (20 \text{ do } 25) I_{S(50)}$              | sve stijene                                  | ISRM, 1985. [13]                    |
| $UCS = (\text{od } 14,5 \text{ do } 27) I_{S(50)}$ | vapnenac                                     | Romana, 1999. [14]                  |
| $UCS = 24,4 I_{S(50)}$                             | čvrste stijene                               | Quane i Russel, 2003. [15]          |
| $UCS = 3,86 I_{S(50)}^2 + 5,65 I_{S(50)}$          | slabe stijene                                |                                     |
| $UCS = 7,3 I_{S(50)}^{1,71}$                       | vapnenac, lapor, vapnenac, pješčenjak, lapor | Tsiambaos i Sabatakakis, 2004. [16] |
| $UCS = 24,8 I_{S(50)} - 39,6$                      | stijene s n < 1%                             | Kahraman i ost., 2005. [17]         |
| $UCS = 10,2 I_{S(50)} + 23,4$                      | stijene s n > 1%                             |                                     |
| $UCS = 10,58 I_{S(50)}^{1,14}$                     | sve stijene                                  | Tsallas i ost., 2009. [18]          |
| $UCS = 10,46 I_{S(50)}^{1,12}$                     | sedimentne stijene                           |                                     |
| $UCS = 6,65 I_{S(50)}^{1,34}$                      | magmatske stijena                            |                                     |
| $UCS = 18,15 I_{S(50)}$                            | metamorfne stijene                           |                                     |

UCS - jednoosna tlačna čvrstoća ([MPa]);  $I_{S(50)}$  - indeks čvrstoće [MPa]

Određivanje indeksa čvrstoće  $I_{s(50)}$  postupkom opterećenja u točki indeksno je ispitivanje koje se od početka razvijalo upravo radi procjene UCS, tako da postoje brojni radovi u kojima su objavljene jednadžbe s tom svrhom. U tablici 3. prikazane su najznačajnije jednadžbe kojima se procjenjuju vrijednosti UCS različitih stijena koje su slične onima u Hrvatskoj.

Vezano uz tablicu 3. važno je naglasiti kako su eksponencijalne jednadžbe točnije od linearnog oblika jednadžbi za gotovo sve vrste stijena, osim metamornih stijena kod kojih se linearna jednadžba pokazala malo točnijom [18].

Osim indeksa čvrstoće, veliku primjenu u procjenama našla je tvrdoća materijala koja se određuje pomoću Schmidtovog čekića. Na temelju Schmidtove tvrdoće mogu se uspješno procjenjivati vrijednosti UCS i E, a primjeri jednadžbi utvrđenih s tom svrhom prikazani su u tablici 4. Domaća iskustva u istraživanju UCS i E [19] provedena za vrijeme intenzivne infrastrukturne izgradnje mreže autocesta u Hrvatskoj, kada je analizirano 518 bušotina ukupne duljine jezgrovanja preko 7000 m, pokazuju kako međuovisnosti UCS sa Schmidtovom tvrdoćom značajno odstupaju od korelacijskih odnosa koji su ovdje prikazani prema radovima [4, 20, 21].

Tablica 4. Jednadžbe jednostruke regresije sa Schmidtovom tvrdoćom

| Jednadžba                                                                                     | Vrsta stijene                                                    | Autori                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| UCS = 4,29 SRH – 67,52<br>E = 1,94 SRH – 33,93                                                | 33 vrste vapnenca                                                | Sachpazis, 1990 [20]        |
| UCS = 2,21e <sup>(0,07 SRH)</sup><br>E = 0,00013 SRH <sup>3,09</sup>                          | kreda, dvije vrste vapnenca, pješčenjak, mramor, sijenit, granit | Katz i ost., 2000. [21]     |
| UCS = e <sup>(0,818+0,059SRH)</sup><br>E = e <sup>(1,146+0,054 SRH)</sup>                     | gips                                                             | Yilmaz i Sendir, 2002. [22] |
| UCS = 0,0028 SRH <sup>2,584</sup><br>E = 0,0987 SRH <sup>1,5545</sup>                         | travertin, vapnenac, dolomitični vapnenac i škriljavac           | Yagiz, 2009. [23]           |
| UCS - jednoosna tlačna čvrstoća [MPa]; E - modul elastičnosti [GPa]; SRH - Schmidtova tvrdoća |                                                                  |                             |

Tablica 5. Jednadžbe jednostruke regresije s brzinom prolaska P-vala

| Jednadžba                                                                                                           | Vrsta stijene                                              | Autori                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| UCS = 9,95 v <sub>p</sub> <sup>1,21</sup>                                                                           | dolomit, pješčenjak, lapor, vapnenac, dijabaz, serpentinit | Kahraman, 2001. [24]          |
| UCS = 31,5 v <sub>p</sub> – 63,7<br>E = 10,67 v <sub>p</sub> – 18,71                                                | dolomit, mramor i vapnenac                                 | Yasar i Erdogan, 2004. [25]   |
| E = 2,06 v <sub>p</sub> <sup>2,78</sup>                                                                             | vapnenac, mramor i pješčenjak                              | Moradian i Behnia, 2009. [26] |
| UCS - jednoosna tlačna čvrstoća [MPa]; E - modul elastičnosti [GPa]; v <sub>p</sub> - brzina prolaska P-vala [km/s] |                                                            |                               |

Osim navedenog, proučavanjem brzina prolaska ultrazvučnog P-vala (v<sub>p</sub>) kroz uzorke različitih materijala uspostavljeni su također različiti odnosi vrijednosti pa tako i jednadžbe jednostruke regresije koje su prikazane u tablici 5.

Jednadžbe jednostruke regresije kojima su se procjenjivali UCS i E imale su linearne i nelinearne oblike. Nelinearni oblici poput jednadžbe opće potencije ili eksponencijalne jednadžbe pokazali su bolju uspješnost procjene. Valja naglasiti kako se u znanstvenim radovima modeli jednostruke regresije često ocjenjuju preko koeficijenta korelacije i/ili koeficijentom determinacije. U nekim radovima ističu se gotovo idealne vrijednosti pa koeficijent determinacije za E iznosi čak 0,99 [21], a 0,98 za UCS [22]. To može zavarati jer bi upotreba rigoroznije metode ocjene poput prilagođenog koeficijenta determinacije (engl. *adjusted R-squared*), korijena srednje kvadratne pogreške (engl. *Root Mean Square Error - RMSE*), AIC kriterija (engl. *Akaike information criterion*) ili unakrsna validacija (engl. *cross-validation*), sigurno pokazala kako modeli nisu baš tako idealni. Upitna je praktična iskoristivost modela gdje određivanje nezavisne varijable zahtijeva složenu pripremu uzoraka, kako je to slučaj s određivanjem v<sub>p</sub>.

### 2.3. Jednadžbe višestruke regresije

Općenito uzevši, višestruka linearna regresija predstavlja se izrazom (1)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \tag{1}$$

gdje je

- Y - zavisna varijabla
- X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ..., X<sub>k</sub> - nezavisne varijable
- β<sub>i</sub> - određuje doprinos nezavisne varijable X<sub>i</sub>
- ε - slučajna pogreška [27].

Linearni oblik višestruke regresijske jednadžbe potpuno dominira u modelima za procjenu UCS i E. Isto tako modeli višestruke regresije su u velikoj većini izrađivani kao usporedni modeli s modelima drugih metoda. U nastavku su predstavljeni modeli koji su načinjeni za stijenski materijal sličan onome u Hrvatskoj te daju procjenu UCS u MPa, a E u GPa.

Tako su Alvarez Grima i Babuška [28] izradili višestruki regresijski model (2) na temelju rezultata ispitivanja materijala koji su pripadali pješčenjacima, vapnencima, dolomitima, granitima i grandioritima. Višestruki regresijski model dan je izrazom:

$$UCS = - 246,804 + 0,386 Ls + 39,268 \rho - 1,307 n \tag{2}$$

gdje je:

- Ls - tvrdoća utvrđena Equotip uređajem
- ρ - gustoća [kg/m<sup>3</sup>]
- n - poroznost [%].

Sličan model (3) nastao ispitivanjem istih vrsta stijena načinili su Meulenkamp i Alvarez Grima [29], a prikazan je jednadžbom

$$UCS = 0,25 L_s + 28,14 \rho - 0,75 n - 15,47 GS - 21,55 RT \quad (3)$$

gdje je:

$L_s$  - tvrdoća utvrđena Equotip uređajem  
 $\rho$  - gustoća [kg/m<sup>3</sup>]  
 $n$  - poroznost [%]  
 $GS$  - veličina zrna  
 $RT$  - tip stijene.

Gokceoglu i Zorlu [30] su pak izradili višestruke regresijske modele (4) i (5) za slabe, razlomljene i tanko uslojene stijene koji su dani izrazima:

$$UCS = -225 + 0,0065 v_p + 1,468 BPI + 4,094 I_{S(50)} + 2,418 TS \quad (4)$$

$$E = -0,038 + 0,003 v_p + 0,892 BPI + 3,568 I_{S(50)} \quad (5)$$

gdje je:

$v_p$  - brzina prolaska ultrazvučnog P-vala [m/s]  
 $BPI$  - Block Punch indeks čvrstoće [MPa]  
 $I_{S(50)}$  - indeks čvrstoće utvrđen opterećenjem u točki [MPa]  
 $TS$  - tlačna čvrstoća [MPa]

Karakus i Tutmez [31] postavili su model (6) za procjenu UCS na temelju ispitivanja stijena mramora, vapnenaca i dacita s područja Malatya i Elazig u Turskoj izrazom:

$$UCS = -35,9 + 0,89 SRH + 13,1 I_{S(50)} - 1,68 v_p \quad (6)$$

gdje je:

$SRH$  - Schmidtova tvrdoća  
 $I_{S(50)}$  - indeks čvrstoće određen postupkom opterećenja u točki [MPa]  
 $v_p$  - brzina prolaska ultrazvučnih valova [km/s].

Za tektonske breče Kahraman i suradnici [32] izradili su modele (7) i (8) koji su prikazani izrazima

$$UCS = -35,09 - 0,33 VBP + 35,38 v_s \quad (7)$$

$$E = -103,88 - 0,16 VBP + 39,65 \rho + 4,2 v_p + 4,33 v_s \quad (8)$$

gdje je:

$VBP$  - volumni udio fragmenata [%]  
 $\rho$  - gustoća [g/cm<sup>3</sup>]  
 $v_s$  - brzina prolaska ultrazvučnog S-vala [km/s]  
 $v_p$  - brzina prolaska ultrazvučnog P-vala [km/s].

Yilmaz i Yuksek su razvili modele (9) i (10) za prirodni gips [33]

$$UCS = -23,859 + 0,48 SRH + 1,863 I_{S(50)} + 0,248 w + 7,972 v_p \quad (9)$$

$$E = 36,315 + 0,64 SRH + 2,254 I_{S(50)} + 0,935 w + 12,838 v_p \quad (10)$$

gdje je:

$SRH$  - Schmidtova tvrdoća  
 $I_{S(50)}$  - indeks čvrstoće određen postupkom opterećenja u točki [MPa]  
 $w$  - udio vode [%]  
 $v_p$  - brzina prolaska ultrazvučnih P-valova [km/s].

Heidari i suradnici [34] su na temelju istraživanja stijena vapnenaca, mramora i dolomita iz Irana, načinili nelinearni višestruki regresijski model (11) za procjenu  $E$  koji je prikazana izrazom

$$\log E = -0,85448 + 0,91326 \log UCS + 0,03198 \log n + 0,16123 \log v_p - 0,22327 \log \rho \quad (11)$$

gdje je:

$UCS$  - jednoosna tlačna čvrstoća [MPa]  
 $n$  - poroznost [%]  
 $v_p$  - brzina prolaska ultrazvučnih P-valova [km/s]  
 $\rho$  - gustoća [g/cm<sup>3</sup>].

Uključujući najutjecajnije petrografske značajke materijala, Manouchehrian je sa suradnicima izradio model (12) za procjenu UCS pješčenjaka [35]. Model je prikazan izrazom

$$UCS = 38 - 352,26 n - 5,3 C_{fc} + 10,6 C_f + 93,15 M_p \quad (12)$$

gdje je:

$n$  - poroznost [%]  
 $C_{fc}$  - postotak željeznog karbonatnog veziva [%]  
 $C_f$  - postotak cementa željeznog oksida [%]  
 $M_p$  - postotak tinjaca [%].

Na temelju ispitivanja 29 vrsta karbonatnog stijenskog materijala s 19 lokaliteta u Republici Hrvatskoj načinjene su jednadžbe za procjenu UCS (13) i  $E$  (14) koje kao nezavisne varijable koriste češće određivana fizikalno-mehanička svojstva [36]:

$$UCS = -222 + 0,0535 \rho + 0,7801 n + 13,76 I_{S(50)} + 1,752 SHRL + 0,0061 v_p \quad (13)$$

$$E = -182 + 0,0619 \rho + 0,7228 n - 0,459 I_{S(50)} + 0,5907 SHRL + 0,0073 v_p \quad (14)$$

gdje je:

$\rho$  - gustoća [kg/m<sup>3</sup>]  
 $n$  - poroznost [%]  
 $I_{S(50)}$  - indeks čvrstoće određen postupkom opterećenja u točki [MPa]  
 $SRH$  - Schmidtova tvrdoća  
 $v_p$  - brzina prolaska ultrazvučnih P-valova [m/s].

Za vapnenice madston i vekston tipa s područja Hrvatske [37] izrađene su jednadžbe (15) i (16):

$$\text{UCS} = -106,2093 - 0,04868 \rho + 11,5110 I_{s(50)} + 0,052 v_p \quad (15)$$

$$\text{UCS} = -240,0109 + 1,5087 n + 11,5916 I_{s(50)} + 0,0522 v_p \quad (16)$$

gdje je:

$\rho$  - gustoća [kg/m<sup>3</sup>]

$n$  - poroznost [%]

$I_{s(50)}$  - indeks čvrstoće određen postupkom opterećenja u točki [MPa]

$v_p$  - brzina prolaska ultrazvučnih P-valova [m/s].

Na temelju prikazanih modela višestruke regresije vidljivo je kako su istraživači većinom kao nezavisne varijable koristili vrijednosti ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava, a manje su korištena petrografska svojstva stijenskog materijala. Zanimljivo je što se u modelima (2), (3), (11), (13) i (14) kao nezavisne varijable koriste zajedno gustoća i poroznost, iako se zbog velike fizikalne povezanosti tih svojstava ne može tvrditi da su varijable neovisne jedna o drugoj, kako to zahtijeva matematički model višestruke regresije.

#### 2.4. Modeli utemeljeni na analizi neizrazitih skupova

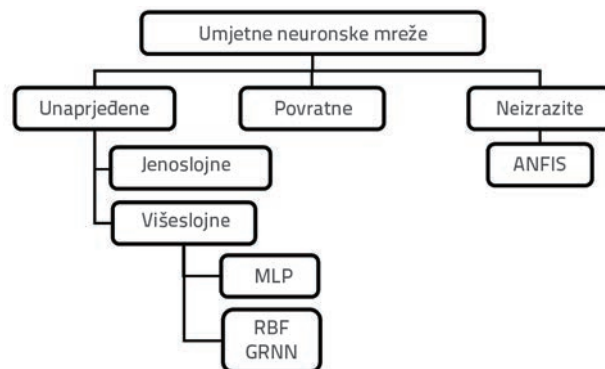
U klasičnoj izrazitoj logici neka smisljena tvrdnja može biti ili istinita ili lažna. Prema neizrazitoj (engl. *fuzzy*) logici tvrdnja nije niti posve istinita niti posve lažna, nego joj se može pripisati "stupanj istinitosti". Uvedena su pravila za korištenje tom logikom, koja predstavljaju poopćenje normalne Booleove algebre [38]. Iako se neizrazita logika na početku primjenjivala u društvenim znanostima, danas je svoju primjenu našla i u tehničkim znanostima, npr. u upravljanju rizicima građevinskih projekata [39], ali i pri raznoraznim procjenama. Najznačajniji i najviše korišteni modeli koji rade na principu neizrazite logike i zaključivanja su Mamdani i Sugeno modeli.

Gokceoglu i Zorlu su na bazi Mamdani modela izradili model za procjenu UCS i E koji je te značajke procjenjivao na temelju istih ulaznih vrijednosti kao u modelima (4) i (5) [30]. Isti tip neizrazitog modela koristili su Karakus i Tutmez pri izradi modela za procjenu UCS. Istraživanja su proveli na devet različitih tipova stijena i ukupno 305 uzoraka. Ulazni podatci u model bili su rezultati laboratorijskih ispitivanja kao u modelu (6) [31]. Spomenuti istraživači su, uspoređujući neizraziti model s modelom višestruke regresije, zaključili kako neizraziti model daje bolju procjenu UCS [30, 31]. Alvarez i Babuska izradili su model za procjenu UCS pomoću teorijskih postavki Takagi-Sugeno modela na temelju rezultata ispitivanja provedenih na 226 uzoraka intaktnog stijenskog materijala koji su pripadali pješčenjacima, vapnencima, dolomitima, granitima i grandioritima. Ulazni podatci bili su isti kao nezavisne varijable u jednadžbi (2). Rezultate procjene usporedili su s rezultatima procjene modela višestruke regresije i rezultatima koje je dala neuronska mreža, uspostavljena na temelju istih ulaznih podataka. Zaključili su da neizraziti model ima bolju procjenu od modela višestruke regresije, a neuronska mreža ima bolju procjenu od neizrazitog modela za niske i

visoke vrijednosti UCS [28]. Daljnji razvoj računalne tehnike programiranja uzrokovao je da se neizraziti modeli nisu u većoj mjeri radili zasebno, već je neizrazita logika postala dio drugih metoda npr. u neuronskim mrežama.

#### 2.5. Procjena pomoću neuronskih mreža

Neuronske mreže sastoje se od sustava ulaznih i izlaznih vrijednosti koje predstavljaju čvorove ili neurone i ostvarenih veza ili sinapsa između njih, čime se na umjetan način nastoji simulirati funkcioniranje ljudskog mozga. U većini slučajeva neuronske mreže nisu realizirane hardverski nego softverski, odnosno pomoću programskog koda. Neuronske mreže ne programiraju se kao algoritmi s točno utvrđenim vrijednostima relacija, nego kao algoritam s mogućnošću učenja na primjerima. "Pokazuju" im se primjeri i rješenja tih primjera pa algoritam može automatski generirati empirijska pravila. Prije upotrebe takvih algoritama na procjenama traženih veličina, računalni programi moraju "trenirati" na skupu vrijednosti poznatih i traženih veličina [38]. Neuronske mreže se sve više koriste za rješavanje različitih problema i zadataka u mnogim područjima, u građevinarstvu na primjer pri projektiranju drvenih konstrukcija [40], u vodnom gospodarstvu [41], determinaciji likvifikacijskog potencijala [42], projektiranju nasipa željezničkih pruga [43], itd. Mogućnost procjene UCS i E primjenom neuronskih mreža proučavana je tijekom ispitivanja karbonatnih stijena s 19 lokaliteta u Republici Hrvatskoj. Tada je laboratorijski ispitano ukupno 425 uzoraka te je tim materijalima utvrđena gustoća, poroznost, indeks čvrstoće, Schmidtova tvrdoća, UCS i E. Izrađeno je 13 modela višestruke regresije i 65 neuronskih mreža tipa MLP (engl. *Multilayer Perceptron*) i RBF (engl. *Radial Basis Function*) u programskom paketu Statistica 10. Tom prilikom je pregledana i opsežna znanstvena literatura [36]. Zbog velikog broja vrsta neuronskih mreža koje su prikazali razni autori, za različita područja primjene postoji i više načina klasifikacija neuronskih mreža. Autori ovog rada na temelju vlastitog iskustva smatraju kako je najprimjerenija pojednostavljena modifikacija klasifikacije koju su napravili Gupra i Rao [44]. Takva klasifikacija (slika 4.) prije svega polazi od analize primijenjenih umjetnih neuronskih mreža koje su se koristile u procjenama UCS i E, a prikazana je u radu [36].



Slika 4. Klasifikacija neuronskih mreža

Meulenkamp i Alvarez izradili su model za procjenu UCS na temelju unaprijeđene neuronske mreže, koja je za učenje koristila algoritam povratnog prostiranja izlazne pogreške. Ulazne veličine u model su iste kao u modelu (3). Mreža je uvježbavana pomoću Levenberg-Marquardt algoritma [29]. Sonmeza i suradnici opisali su korištenje umjetne neuronske mreže u procjeni E za različite vrste stijena na temelju ulaznih vrijednosti UCS i gustoće materijala [45]. Kahraman i suradnici su koristili neuronske mreže pri procjeni UCS i E za tektonske breče. Kod modela za procjenu UCS neuronska mreža imala je strukturu 2-3-1 (broj ulaza, broj neurona u skrivenom sloju, izlazna vrijednost). Ulaz mreže činili su volumni udio fragmenata i brzina prolaska ultrazvučnog S-vala. Mreža modela načinjenog za procjenu E imala je strukturu 4-3-1, a ulaz su činile: volumski udio fragmenata, gustoća, brzina prolaska ultrazvučnog S-vala, brzina prolaska ultrazvučnog P-vala, zaobljenost fragmenata i faktor prosječnog promjera zrna [32]. Primjenu neizrazitih neuronskih mreža u procjeni UCS i E za prirodni gips opisali su Yilmaz i Yuksek. Parametri ulaza u model bile su vrijednosti dobivene laboratorijskim ispitivanjem tvrdoće Schmidtovim čekićem, indeksa čvrstoće određenog postupkom opterećenja u točki, udjela vode te brzine prolaska ultrazvučnih P-valova. Mrežu su načinili pomoću sustava ANFIS (engl. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems) unutar programskih paketa Matlab Version 7,1 i SPSS 10,0. Na osnovi usporedbe rezultata došli su do zaključka da u procjeni UCS i E za stijene gipsa najbolje rezultate postiže neizrazita vrsta neuronskih mreža ANFIS, zatim model s unaprijeđenom vrstom neuronskih mreža, a najslabije rezultate postiže višeregresijski model [33]. Heidari i suradnici opisali su upotrebu neuronskih mreža MLP i RBF arhitekture u procjeni E za vapnence, dolomite i lapore s područja Lorestan u Iranu. Ulazni podatci u model bile su vrijednosti gustoće, poroznosti, brzine prolaska ultrazvučnih P-valova i jednoosne tlačne čvrstoće. Model napravljen na bazi MLP arhitekture pomoću Levenberg-Marquardt algoritma pokazao se boljim [34]. Dehghan i suradnici su na bazi ispitivanja travertina iz Irana načinili modele za procjenu UCS i E. Kao ulazni podatci korištene su laboratorijski utvrđene vrijednosti poroznosti, indeksa čvrstoće, brzine prolaska ultrazvučnih P-valova te tvrdoće utvrđene Schmidtovim čekićem. Modeli su rađeni na principu generalizirane GRNN (engl. *Generalized regression Neural Networks*) vrste mreže i MLP mreže učene pomoću algoritma povratnoga prostiranja izlazne pogreške [46]. Singh i suradnici su, koristeći skup od 95 ispitivanja različitih stijena, načinili neizraziti neuronski model (ANFIS) za procjenu modula elastičnosti, koji kao ulazne parametre koristi indeks čvrstoće utvrđen opterećenjem u točki, gustoću materijala i upijanje vode [47]. Manouchehrian je sa suradnicima izradio model na bazi umjetnih neuronskih mreža za procjenu jednoosne tlačne čvrstoće pješčenjaka pomoću petrografskih karakteristika [35]. U publikacijama [29, 32-36, 46] uspoređeni su modeli višestruke regresije i neuronskih mreža te je zaključeno da neuronske mreže daju bolje rezultate procjena. Usporedba se obavljala na temelju koeficijenta korelacije između izmjerenih i procijenjenih

veličina UCS i E te veličine korijena srednje kvadratne pogreške (engl. *Root Mean Square Error* - RMSE). Također se arhitektura MLP pokazala bolja od RBF [35, 36] i generaliziranog modela [46].

## 2.6. Procjena pomoću evolucijskog programiranja

Genetički algoritmi su inspirirani Darwinovom teorijom prirodne selekcije te koriste njezinu terminologiju, a probleme rješavaju u nekoliko koraka. "Geni" u tom algoritmu su različite programske naredbe. Program koji za više zadanih setova ulaznih podataka dobiva više ispravnih rezultata ocjenjuje se kao bolji [38]. Baykasoglu i suradnici primijenili su napredne tehnike evolucijskog programiranja MEP (engl. *multi expression programming*), GEP (engl. *gene expression programming*) i LGP (engl. *linear genetic programming*) za procjenu UCS mekih vapnenaca na području Gaziantep u Turskoj. Najučinkovitiju procjenu pokazao je LGP model evolucijskog programiranja [48]. Ozbeka sa suradnicima opisao je upotrebu GEP modela za procjenu UCS bazalta i tufa te pokazao dobro slaganje između eksperimentalno utvrđenih podataka i rezultata postignutih procjenom [49]. Beiki i suradnici su na temelju genetskog programiranja načinili modele za procjenu UCS i E karbonatnih stijena na temelju rezultata ispitivanja uzoraka prikupljenih na Asmary formaciji u Iranu [50].

U budućnosti se očekuje više radova koji će uspoređivati modele evolucijskog programiranja s ostalim složenim modelima, a zasad su oni dokazano bolji od modela višestruke regresije.

## 2.7. Procjene temeljene na regresijskom stablu

Regresijsko stablo je jedna vrsta metode zvane stablo odlučivanja koje omogućuje procjenu numeričkih varijabli. Tom metodom izrađuju se modeli koji su jednostavni za korištenje i interpretaciju. Dijelove stabla čine podskupovi načinjeni od ulaznog skupa podataka prema vrijednostima jedne od prediktorskih varijabli, tako da je pojedina prediktorska varijabla otprilike konstantna u svakom pojedinom podskupu. Regresijsko stablo se grana slijedom pitanja na koja se može odgovoriti sa "da" ili "ne" i niza prilagođenih vrijednosti varijable koja se procjenjuje. Svako pitanje utvrđuje zadovoljava li prediktor zadani uvjet. Ovisno o odgovorima na jedno pitanje, prelazi se na drugo pitanje, ili se utvrđuje kako je postignuta prilagođena vrijednost odgovora (varijable koju procjenjujemo). Proces izrade zaustavlja se kad je postignut kriterij zaustavljanja [51]. Metodu regresijskog stabla primijenio je Tiryaki za procjenu UCS intaktnog stijenskog materijala kod strojnog iskopa stijena gdje je kao prediktorske varijable koristio vrijednosti ispitivanja gustoće, NCB konusnog otiska i skleroskopske tvrdoće. Model je načinio na osnovi ispitivanja 44 uzorka koji su imali širok raspon čvrstoće, od vrlo mekih do vrlo čvrstih stijena [52]. Jedan od glavnih problema regresijskih stabala je to što grananje i ugađanje stabla uvelike ovisi o podacima na kojima se obavlja izrada modela. Naime, ako su podaci za izradu podijeljeni



nasumično u dva dijela, rezultati za isti ulazni skup mogu biti vrlo različiti.

Tijekom vremena razvijani su razni postupci koji se koriste pri izradi regresijskog stabla za povećanje točnosti modela, poput metode Bagging i metode slučajnih šuma (engl. *Random forest*). Bagging je metoda koja pokušava smanjiti varijabilnost rezultata procjene, generirajući velik broj uzoraka iz početnog skupa pomoću uzorkovanja s vraćanjem (engl. *sampling with replacement*), zatim gradi model na svakom uzorku i računa prosjek dobivenih procjena. Bagging može bitno poboljšati točnost procjene, ali problem nastaje ako se pojavi vrlo jaka prediktorska varijabla koja dominira pa modeli izgledaju vrlo slični jedni drugima. Slučajne šume izbjegavaju navedeni problem stvarajući velik broj stabala na temelju uzoraka koji su odabrani slučajnim odabirom s ponavljanjem iz početnog skupa za treniranje, ali pri svakom grananju na slučajan način bira podskup prediktora iz kojeg bira onaj mjerodavni pri grananju [53]. Za vapnence tipa madston i vekston s područja Hrvatske izrađeni su modeli bazirani na regresijskim stablima za procjenu UCS, a najbolji se pokazao onaj koji je koristio metodu slučajnih šuma za poboljšanje procjene. Pri tome su prediktorske varijable bile vrijednosti ispitivanja gustoće, efektivne poroznosti, indeksa čvrstoće, Schmidtove tvrdoće i brzine prolaska ultrazvučnog P-vala [37].

Budući da se regresijsko stablo tek počinje primjenjivati u procjeni UCS, tek će se budućim radovima saznati doprinos te metode pri istraživanju. Dobro je to što se kod regresijskog stabla mogu koristiti ulazni prediktori koji su međusobno ovisni jedan o drugom te nema ograničenja kao kod modela višestruke regresije.

### 3. Rasprava

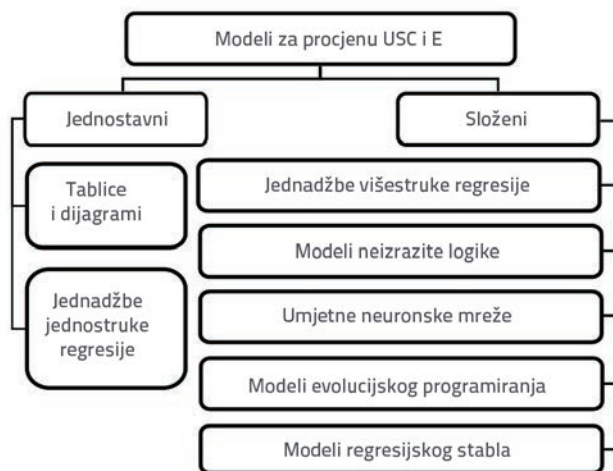
Autori ovog preglednog rada, bazirajući se kako na radovima dugih autora tako i na vlastitim radovima, odnosno radu [36] koji se bavi procjenama UCS i E te radu [37] koji se bavi regresijskim stablima, ističu da je najviše procjena rađeno sa svrhom određivanja UCS, zatim E, dok su druge značajke bitno manje zastupljene. Metode za procjenu UCS i E mogu se najlakše podijeliti prema složenosti postupka i tehnologiji kojom se pri procjenjivanju one služe. Prema tome, postoje jednostavne i složene metode za procjenu (slika 5.).

Jednostavnim metodama pomoću dijagrama, tablice ili na temelju jedne vrste indeksnog ispitivanja procjenjuje se UCS ili E. Složene metode koriste rezultate više vrsta ispitivanja na temelju kojih se radi procjena, a za uspostavljanje tih metoda potrebni su složeniji računalni programi.

Procjene UCS i E intaktnog stijenskog materijala na temelju različitih dijagrama, kao i u slučaju terenske identifikacije priručnim sredstvima, daju samo grube i okvirne vrijednosti, a takve su procjene uvelike podložne subjektivnim dojmovima procjenitelja.

Jednadžbe jednostruke regresije daju relativno dobre rezultate procjena, no ovise o vrstama stijena za koje su napravljene

i unutar iste vrste stijene ne pokrivaju baš sve varijacije u značajkama. Sve to uvjetuje velik broj objavljenih jednadžbi u literaturi koje nisu sve i iskoristive jer se neke od njih temelje na ispitivanjima koja su se u međuvremenu modificirala. Isto tako pri upotrebi ovakve vrste jednadžbi treba paziti na raspone vrijednosti, kako veličine koja se procjenjuje, tako i veličine na temelju koje se procjenjuje.



Slika 5. Podjela metoda za procjenu fizikalno-mehaničkih značajki intaktnog stijenskog materijala

Usporedbe složenih metoda za procjenu UCS i E, koje su razvili mnogi istraživači, pokazuju određenu hijerarhiju u uspješnosti procjena. Tako, na primjer, modeli višestruke regresije u usporedbi s drugim modelima složenih metoda imaju najveću pogrešku. Međutim, ti su modeli puno jednostavniji za korištenje jer ne trebaju složene računalne programe. Nadalje, modeliranje pomoću neizržite logike daje bolje rezultate u kombinaciji s neuronskim mrežama, nego u vidu izgradnje isključivo neizržitih modela. Modeli izrađeni pomoću neuronskih mreža do sada su se pokazali kao najkorisniji alat za procjenu UCS i E. Velik potencijal u mogućnosti procjena pokazuju modeli evolucijskog programiranja i modeli bazirani na regresijskom stablu. Do sada su se oni pokazali boljima od modela višestruke regresije.

Iako složeni modeli procjene imaju povoljnije parametre uspješnosti od jednostavnih modela, ipak se s obzirom na to da se procjene koriste u preliminarnim fazama projektiranja ne smiju zanemarivati jednostavnije metode modeliranja, pogotovo izrada jednadžbi jednostruke regresije jer su one jednostavne za korištenje i dovoljno točne u preliminarnim fazama projektiranja. Premda su još uvijek složene metode za procjenu UCS i E bez šire praktične inženjerske primjene, jer ih izrađuju samo znanstvenici u svojim istraživanjima, ipak se u budućnosti očekuje sve veća prisutnost modeliranja sa složenim metodama zbog sve veće dostupnosti komercijalnih programskih paketa (Statistica, Matlab) kojima je moguće izrađivati složenije modele. Budući da znanstvenici sve više programiraju i vlastite aplikacije za procjenu, one će u svrhu testiranja vrlo vjerojatno postati dostupne preko interneta

te će se i tako omogućiti još šira primjena složenih metoda procjene. Pri složenom modeliranju treba se voditi inženjerskom praktičnošću te izbjegavati upotrebu ulaznih parametara do kojih je teško doći jer njihovo određivanje zahtijeva kompliciranu pripremu uzoraka.

#### 4. Zaključak

Ovim radom potvrđuje se kako stvarna potreba za procjenom fizikalno-mehaničkih značajki materijala, pogotovo u određenim idejnim fazama inženjerskog projektiranja, ne znači zamjenu za ispitivanja, nego procjene služe kao nadopuna i provjera

određenih specifičnih podataka. Pri budućim izradama modela nije potrebno zanemarivati jednostavnije metode modeliranja, pogotovo jednadžbe jednostruke regresije jer su one jednostavne za korištenje te dovoljno točne u preliminarnim fazama projektiranja.

Kod složenih metoda svakako treba izbjegavati upotrebu ulaznih parametara u vidu fizikalno-mehaničkih značajki čije određivanje zahtijeva složenu pripremu uzoraka. Poželjno bi bilo uzimati vrijednosti gustoće, poroznosti, indeksa čvrstoće, Schmidtovu tvrdoću te ih kombinirati s drugim svojstvima materijala koji se lako određuju, poput teksturnih i strukturnih opisa intaktnog stijenskog materijala.

#### LITERATURA

- [1] Marinos, P., Hoek, E.: Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60 (2001), pp. 85-92, <http://dx.doi.org/10.1007/s100640000090>
- [2] Price, D.G.: *Engineering Geology: Principles and practice*, (ur. De Freitas M.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.
- [3] Deere, D.U., Miller, R.P.: Engineering classification and index properties for intact rock, *Technical Report No. AFNL-TR-65-116. Air Force Weapons Laboratory*, New Mexico, 1966.
- [4] Miller, R.P.: Engineering classification and index properties for intact rock, *Ph.D Dissertation, University of Illinois*, USA, 1965.
- [5] Turgrul, A., Zarif, I.H.: Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey, *Engineering Geology* 51 (1999), pp 303-317, [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00071-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00071-4)
- [6] Palchik, V.: Influence of porosity and elastic modulus on uniaxial compressive strength in softbrittle porous sandstones, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 32 (1999), pp 303-309, <http://dx.doi.org/10.1007/s006030050050>
- [7] Leite, M.H., Ferland, F.: Determination of Unconfined Compressive Strength and Young's Modulus of Porous Materials by Indentation Tests, *Engineering Geology*, 59 (2001) 3-4, pp. 267-280.
- [8] Lashkaripour, G.R.: Predicting mechanical properties of mudrock from index parameters, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61 (2002), pp. 73-77, <http://dx.doi.org/10.1007/s100640100116>
- [9] Palchik, V., Hatzor, Y.H.: Influence of porosity on tensile and compressive strength of porous chalks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 37 (2004), pp. 331-341, <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-003-0020-1>
- [10] Tugrul, A.: The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey, *Engineering Geology*, 75 (2004), pp. 215-227, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.05.008>
- [11] D'Andrea, D.V., Fisher, R.L., Fogelson, D.E.: Prediction of compression strength from other rock properties, *Colorado School of Mines Quarterly*, 59 4b (1964), pp. 623 - 640.
- [12] Read, J.R.L., Thornton, P.N., Regan, W.M.: A rational approach to the point load test, *Proc. 3rd Australian-New Zealand Geomechanics Conference 2*, pp. 35-39, 1980.
- [13] ISRM: Suggested method for determining point load strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, 22 (1985), pp. 51-60, [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)92327-7](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(85)92327-7)
- [14] Romana, M.: Correlation between uniaxial compressive and point-load (Franklin test) strengths for different rock classes, *9th ISRM Congress*, Paris, pp. 673-676, 1999.
- [15] Quane, S.L., Russel, J.K.: Rock strength as a metric of welding intensity in pyroclastic deposits, *European Journal of Mineralogy*, 15 (2003), pp. 855-64, <http://dx.doi.org/10.1127/0935-1221/2003/0015-0855>
- [16] Tsiambaos, G., Sabatakakis, N.: Considerations on strength of intact sedimentary rocks. *Engineering Geology*, 72 (2004), pp. 261-273, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.10.001>
- [17] Kahraman, S., Gunaydin, O., Fener, M.: The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load indeks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 42 (2005), pp. 584-589, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.02.004>
- [18] Tziallas, G.P., Tsiambaos, G., Saroglou, H.: Determination of rock strength and deformability of intact rocks, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 14 G (2009), pp 1-12.
- [19] Pollak, D.: Utjecaj trošenja karbonatnih stijenskih masa na njihova inženjerskogeološka svojstva, *Doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet*, Zagreb, 2007.
- [20] Sachpazis, C. I.: Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 42 (1990), pp. 75-84, <http://dx.doi.org/10.1007/BF02592622>
- [21] Katz, O., Reches, Z., Roegiers, J.C.: Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 37 (2000), pp 723-728, [http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609\(00\)00004-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00004-6)
- [22] Yilmaz, I., Sendir, H.: Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey), *Engineering Geology*, 66 (2002), pp. 211-219, [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00041-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00041-8)
- [23] Yagiz, S.: Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68 (2009), pp. 55-63, <http://dx.doi.org/10.1007/s10064-008-0172-z>

- [24] Kahraman, S.: Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38 (2001), pp. 981-994, [http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609\(01\)00039-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00039-9)
- [25] Yasar, E., Erdogarg Y.: Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41 (2004), pp. 871-875, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.01.012>
- [26] Moradian, Z.A., Behnia, M.: Predicting the uniaxial compressive strength and static young's modulus of intact sedimentary rocks using the ultrasonic test, *International Journal of Geomechanics (ASCE)*, 9 (2009), pp.14-19, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2009\)9:1\(14\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2009)9:1(14))
- [27] Au-Yong, C.P., Ali A.S., Ahmad F.: Office building maintenance: Cost prediction model, *Građevinar*, 65 (2013) 9, pp. 803-809.
- [28] Alvarez Grima, M., Babuska, R.: Fuzzy model for the prediction of unconfined compressive strength of rock samples, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36 (1999), pp. 339-349, [http://dx.doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00007-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00007-8)
- [29] Meulenkamp, F., Alvarez Grima, M.: Application of neural networks for the prediction of the unconfined compressive strength (UCS) from Equotip hardness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, 36 (1999), pp 29-39, [http://dx.doi.org/10.1016/S0148-9062\(98\)00173-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0148-9062(98)00173-9)
- [30] Gokceoglu, C., Zorlu, K.: A fuzzy model to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity of a problematic rock, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 17 (2004), pp. 61-72, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2003.11.006>
- [31] Karakus, M., Tutmez, B.: Fuzzy and Multiple Regression Modelling for Evaluation of Intact Rock Strength Based on Point Load, Schmidt Hammer and Sonic Velocity, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 39 (2006) 1, pp. 45-57.
- [32] Kahraman, S., Gunaydin, O., Alber, M., Fener, M.: Evaluating the strength and deformability properties of Misis fault breccia using artificial neural networks, *Expert Systems with Applications*, 36 (2008) 3, pp. 6874-6878.
- [33] Yilmaz, I., Yuksek, G.: Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, and ANFIS models, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46 (2008) 4, pp. 803-810.
- [34] Heidari, M., Khanlari, G.R., Momeni, A.A.: Prediction of elastic modulus of intact rocks using artificial neural networks and non-linear regression methods, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4 (2010) 12, pp. 5869-5879.
- [35] Manouchehrian, A., Sharifzadeh, M., Moghadam, R.H.: Application of artificial neural networks and multivariate statistics to estimate UCS using textural characteristics, *International Journal of Mining Science and Technology*, 22 (2012), pp. 229-236, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2011.08.013>
- [36] Briševac, Z.: Model međuovisnosti fizikalno-mehaničkih značajki karbonatnih stijena, *Doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet*, Zagreb, 2012.
- [37] Briševac, Z., Špoljarić, D., Gulam, V.: Estimation of uniaxial compressive strength based on regression tree models., *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 29 (2014), pp 39-47.
- [38] Dvornik, J.: Numeričke, simboličke i heurističke metode, *GRAĐEVINAR*, 55 (2003) 10, pp. 575-582.
- [39] Cerić, A., Marić, T.: Određivanje prvenstva pri upravljanju rizicima građevinskih projekata, *GRAĐEVINAR*, 63 (2011) 3, pp. 265-271.
- [40] Žagar, Z., Janjuš, G.: Primjena neuralnih mreža u projektiranju drvenih konstrukcija, *GRAĐEVINAR*, 54 (2002) 10, pp. 577-583.
- [41] Vouk, D., Malus, D., Carević, D.: Neuralne mreže i njihova primjena u vodnom gospodarstvu, *GRAĐEVINAR*, 63 (2011) 6, pp. 547-554.
- [42] Farrokhzad, F., Choobbasti, A.J., Barari, A.: Determination of liquefaction potential using artificial neural networks, *GRAĐEVINAR*, 63 (2011) 9, pp. 837-845.
- [43] Tayfur, G., Egeli, I.: Railway embankment design based on neural networks, *GRAĐEVINAR*, 65 (2013) 4, pp. 319-330.
- [44] Gupta, M.M., Rao, D.H.: *Neuro-Control Systems, Theory and Applications*, IEEE Press, New York, 1994.
- [45] Sonmeza, H., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A., Kayabasi, A.: Estimation of rock modulus: For intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43(2006), pp. 224-235, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.007>
- [46] Dehghan, S., Sattari, G., Chehreh, C.S., Aliabadi, M.A.: Prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity for Travertine samples using regression and artificial neural Networks, *Mining Science and Technology*, 20 (2010), pp. 41-46, [http://dx.doi.org/10.1016/s1674-5264\(09\)60158-7](http://dx.doi.org/10.1016/s1674-5264(09)60158-7)
- [47] Singh, R., Kainthola, A., Singh, T. N.: Estimation of elastic constant of rocks using an ANFIS approach, *Applied Soft Computing*, 12 (2012), pp. 40-45, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2011.09.010>
- [48] Baykasoglu, A., Gullu H., Canakci, H., Ozbakir, L.: Prediction of compressive and tensile strength of limestone via genetic programming, *Expert Systems with Applications*, 35 (2008), pp. 111-123, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2007.06.006>
- [49] Ozbeka, A., Unsal, M., Dikec, A.: Estimating uniaxial compressive strength of rocks using genetic expression programming, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, (2013) 5, pp. 325-329, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.05.006>
- [50] Beiki, M., Majidi, A., Givshad, A.D.: Application of Genetic Programming to predict the uniaxial compressive strength and elastic modulus of carbonate rocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 63 (2013), pp. 159-169, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.08.004>
- [51] Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., Stone, C.J.: *Classification and Regression Trees*, Chapman and Hall/CRC, 1984.
- [52] Tiryaki, B.: Predicting intact rock strength for mechanical excavation using multivariate statistics, artificial neural networks and regression trees, *Engineering Geology*, 99 (2008), pp. 51-60, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.02.003>
- [53] James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R.: *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*, Springer, New York, 2014.