

## MODELIRANJE REZULTATOV PROCTORJEVEGA PRESKUSA

### MODELING THE RESULTS OF THE PROCTOR TEST

**Primož Pavšič, Stanislav Lenart**

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija  
primoz.pavsic@zag.si

*Prejem rokopisa - received: 2002-12-17; sprejem za objavo - accepted for publication: 2003-01-21*

V gradbeništvu so zemljine in kameni agregati zelo pogost gradbeni material. Kadarkoli so v uporabi zemljine in kamnine pri gradnji voziščnih konstrukcij, za nasipe ali zasipe, jih je treba skoraj vedno zgotoviti, tako da dosežemo potrebne inženirske lastnosti. Zgoščevanje oziroma kompaktiranje na terenu poteka z mehanskimi sredstvi, kot so valjanje, vibriranje ali zbijanje. Za doseg zadovoljivih rezultatov ob sprejemljivi ceni pa je treba spremljati stopnjo zgoščenosti. Laboratorijska preiskava določitve optimalne vlažnosti in maksimalne suhe zgoščenosti, poznana kot Proctorjev preskus, je osnova za spremljanje kvalitete vgrajevanja materiala na terenu.

Preskus je znan in standardiziran že dalj časa. Z njim želimo določiti, pri kateri vlažnosti je pri enaki energiji zgoščanja dosežena maksimalna suha zgoščenost materiala in kakšna ta je. V ta namen zgoščamo material v kalup pri različnih vlažnostih. S krivulje, ki jo narišemo skozi točke na diagramu odvisnosti suhe prostorninske mase od vlažnosti, določimo maksimum in s tem podan rezultat preiskave. Prav pri izrisu krivulje, ki je največkrat ročna z uporabo krivuljnikov ali pa se uporabljajo trendne črte različnih polinomov, pa lahko pride do napak. Oblika in s tem tudi maksimum krivulje je tako odvisen od operaterja ali izbire polinoma.

V tem delu sva želela prikazati možnost uporabe matematične funkcije, ki s primernim modeliranjem dobro opisuje iskano odvisnost. S poenotenjem obdelave rezultatov Proctorjevega preskusa bi se tako povečala primerljivost med različnimi laboratoriji in zmanjšala napaka.

Ključne besede: Proctorjev preskus, geomehanika, modeliranje

In civil engineering, soils and unbound granular materials are common construction materials. Whenever these materials are used for road construction, embankments, or as fill material, it is nearly always necessary to compact it to a dense state to obtain satisfactory engineering properties. Compaction on site is usually done by rolling, vibrating or ramming. Control of the degree of compaction is necessary to achieve a satisfactory result at a reasonable cost. A laboratory compaction test, known as the Proctor test, provides the basis for the control procedures used on site.

The test is well known and has been standardized for some time. Its aim is to determine the moisture content at which maximum dry density is obtained by compaction with a specific energy. For this purpose the material is compacted in a mould at different moisture contents. From a best-fit curve, drawn through the points on a dry density/moisture content diagram, the maximum, which is also a result of the test, is identified. The drawing of the curve, which is mainly done manually or with use of different polynomial trend lines, can be a cause of error. So the shape of the curve and the maximum also depend on the operator or the selection of a polynomial.

In this paper we would like to show the applicability of a mathematical function, which with modeling of its parameters describes well the relationship between moisture content and dry density. With uniform processing of the Proctor test data, the results of different laboratories will be more comparable and the possibility for error will decrease.

Key words: Proctor test, geomechanics, modeling

### 1 UVOD

Ob uporabi zemljin, kamnin ali sekundarnih surovin v gradbene namene je le-te treba skoraj vedno zgotoviti na primerno stopnjo zgoščenosti, s čimer pridobimo zadovoljive inženirske lastnosti uporabljenega materiala, ki jih z nezgoščenim materialom ne bi bilo mogoče doseči. Zgoščanje materialov na terenu poteka z mehanskimi sredstvi, kot so valjanje, vibriranje ali zbijanje.<sup>1</sup> Laboratorijske preiskave določitve maksimalne suhe zgoščenosti in optimalne vlažnosti omogočajo nadzor nad ustreznostjo izvedenih del in so nujne za doseganje ustreznih inženirskih lastnosti vgrajenega materiala ob minimalnih stroških.

Osnove zgoščanja zemljin segajo v leto 1930. V tem času je R. R. Proctor odkril, da je zgoščanje zemljin funkcija suhe zgoščenosti  $\rho_d$ , vlažnosti  $w$ , energije zgo-

ščanja in tipa zemljine (zrnavostne sestave, vrste glinenih mineralov itd.)<sup>2</sup>. Njemu v čast se laboratorijski postopek zgoščanja zemljin in kamnin imenuje Proctorjev postopek ali preskus. Enako odvisnost najdemo tudi pri kamenih agregatih in sekundarnih surovinah. Glede na vrsto materiala se danes uporabljata dva postopka določitve maksimalne suhe zgoščenosti in optimalne vlažnosti, in sicer standardni, kjer je energija zgoščanja  $596 \text{ J/m}^3$ , in modificirani z energijo zgoščanja  $2672 \text{ J/m}^3$ . Namen preiskave je določitev maksimalne suhe zgoščenosti in njej pripadajoče optimalne vlažnosti. Ta dva podatka sta osnova kakovosti vgradnje materiala v neki zemeljski objekt. Določitev maksimalne suhe zgoščenosti in optimalne vlažnosti materiala z laboratorijskim preskusom je torej izredno pomembna za kvaliteto izvedenih del na nekem zemeljskem objektu.

## 2 OPIS PROCTORJEVEGA PRESKUSA

Proctorjev preskus je standardizirana preiskava, ki je opisana v mnogih nacionalnih standardih. V nastajajoči evropski regulativi jo najdemo v obliki predstandarda prEN 13286-2 Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 2: Test methods for laboratory reference density and moisture content - Proctor compaction. Metode se med seboj ne razlikujejo znatno. Osnova vseh metod in s tem tudi metode po prEN 13286-2 je določitev maksimalne suhe zgoščenosti in optimalne vlažnosti preiskovanega materiala. V ta namen zgoščamo material v kalup znane prostornine s predpisano energijo zgoščanja (odvisna je od mase bata, višine njegovega pada in števila plasti) z uporabo avtomatskega ali ročnega Proctorjevega aparata (**slika 1**). Zgoščanje materiala v kalup znane prostornine izvedemo pri najmanj petih različnih vlažnostih pri enaki energiji zgoščanja. Pri vsakem tako pridobljenem preizkušancu določimo mokro in suho zgoščenost. Rezultate, to je suho zgoščenost in vlažnost posameznih "točk", podamo v diagramu suha zgoščenost/vlažnost<sup>3</sup>. Skozi dobljene točke narišemo krivuljo, katere maksimum pomeni maksimalno suho zgoščenost in optimalno vlažnost materiala pri določeni energiji zgoščanja. Prav izris krivulje odvisnosti suhe zgoščenosti od vlažnosti, ki jo imenujemo tudi krivulja zgoščanja, pa vpliva na rezultat preskusa.



**Slika 1:** Avtomatski Proctorjev aparat  
**Figure 1:** Mechanical Proctor apparatus

Poleg krivulje odvisnosti suhe zgoščenosti od vlažnosti podamo na diagramu tudi krivuljo polne zasičenosti materiala ( $S_r = 100\%$ ), ki podaja suho zgoščenost materiala pri polni zasičenosti glede na vlažnost. Krivulja zgoščanja se z višanjem vlažnosti približuje krivulji polne zasičenosti in je ne doseže tudi pri visokih vlažnostih.

## 3 REZULTATI PROCTORJEVEGA PRESKUSA IN NJHOVO MODELIRANJE

Standardi za izvedbo preiskave ne predpisujejo načina izrisa krivulje. Ta se v praksi izvaja na številne načine, od ročnega izrisa s krivuljniki, do uporabe različnih trendnih črt, kar je z uporabo računalnikov vse pogostejše. Razlike v načinu izrisa krivulje posledično podajajo različne vrednosti maksimalne suhe zgoščenosti in optimalne vlažnosti preiskanega materiala. Razlike v pridobljenih rezultatih Proctorjevega preskusa pomenijo tudi različno osnovo za vrednotenje ustreznosti vgradnje določenega materiala v zemeljski objekt. Oblika in s tem tudi maksimum krivulje je tako odvisen od operaterja ali izbire polinoma.

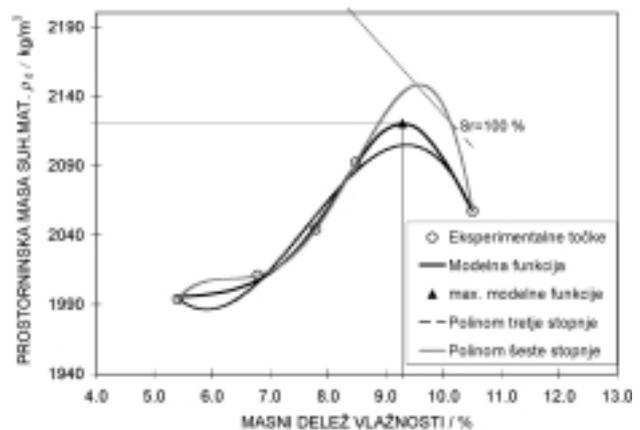
Večina polinomov ni uporabna za vse vrste materialov. Odmiki, ki se pojavljajo, so včasih lahko zamegljivi, večinoma pa so razlike v rezultatu preiskave močno odvisne od izbire polinoma (**diagram 1**).

Pri modeliranju rezultatov Proctorjevega preskusa smo se za določitev modelne funkcije naslonili na matematično metodologijo izbire empiričnih obrazcev<sup>4</sup>. S kombinacijo metode najmanjših kvadratov in Newtonove tangentne metode smo določili najboljše ujemanje modelne funkcije z eksperimentalno določenimi točkami. Obrazec

$$y = Ae^{bx+cx^2} \quad (1)$$

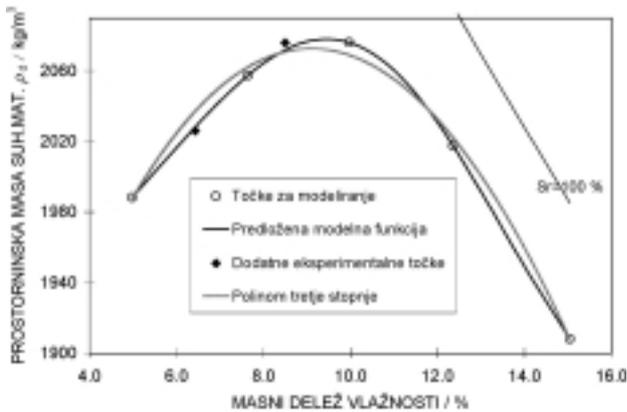
smo modificirali v obliko predlagane modelne funkcije

$$\rho_d = Ae^{(B(\frac{w}{10})^3 + C(\frac{w}{10})^2 + D(\frac{w}{10}) + E)} + F \quad (2)$$



**Diagram 1:** Primerjava uporabe različnih matematičnih funkcij za ovrednotenje rezultatov Proctorjevega preskusa

**Diagram 1:** Comparison of different mathematical functions for assessment of the Proctor test results



**Diagram 2:** Ujemanje dodatnih eksperimentalnih točk z modelno funkcijo

**Diagram 2:** Correlation of additional experimental points with model function

pri čemer so:

$\rho_d$  suha zgoščenost

$w$  vlažnost in

$A, B, C, D, E$  in  $F$  parametri.

Parametri so proste konstante, ki dobijo vrednost z iterativnim postopkom za vsak vzorec posebej. Z iteracijo iščemo minimum vsote kvadratov razlike med eksperimentalno določeno zgoščenostjo in zgoščenostjo, izračunano z modelno funkcijo:

$$\Sigma[(\rho_{d \text{ exp}}) - \rho_{d \text{ exp}}(A, B, C, D, E, F, w)]^2 = \min \quad (3)$$

kjer je  $\rho_{d \text{ exp}}$  eksperimentalno določena vrednost suhe zgoščenosti pri izbrani vlažnosti  $w$ . Maksimum tako dobljene funkcije nam podaja optimalno vlažnost in maksimalno suho zgoščenost preiskovanega materiala. Izračunamo ju po enačbah:

$$w_{opt_{1,2}} = 10 \left( \frac{-C \pm \sqrt{C^2 - 3BD}}{3B} \right) \quad (4)$$

$$\rho_{d \text{ max}_{1,2}} = Ae^{(B(\frac{w_{opt}}{10})^3 + C(\frac{w_{opt}}{10})^2 + D(\frac{w_{opt}}{10}) + E)} + F \quad (5)$$

Iskani rezultat pomeni višjo vrednost izračunane  $\rho_{d \text{ max}}$  in njej pripadajočo  $w_{opt}$ .

Izmed različnih funkcij, preskušanih na nekaj sto primerih različnih vrst kamenih agregatov in zemljin, se je izbira predložene modelne funkcije (enačba 2) izkazala za najprimernejšo. Z njeno uporabo nam je uspelo dobro ovrednotiti skoraj vse obdelane praktične primere. V primerih slabega ujemanja modelne funkcije s praktičnimi rezultati pa se pojavlja sum napake pri izvedbi preskusa. Modeliranje rezultatov Proctorjevega preskusa smo dodatno preverili z izvedbo preskusa, pri katerem smo za vsako "točko" pripravili material popolnoma enake zrnastostne sestave. V praksi se za vsako točko uporabi material povprečne zrnastosti, ki se ga pridobi iz osnovnega materiala z mešanjem in četrtinjenjem. Na podlagi petih točk smo izvedli

modeliranje z uporabo predložene modelne funkcije in polinoma tretje stopnje (trendna črta). Poleg prej omenjenih petih točk smo pripravili še dve točki, ki v modeliranje nista bili vključeni. Njuno ujemanje z modelno funkcijo je razvidno z **diagrama 2** in kaže na uporabnost predložene modelne funkcije pri opisovanju odvisnosti suhe zgoščenosti od vlažnosti pri izvedbi Proctorjevega preskusa. Odmik polinomske trendne črte od rezultatov preskusa in tudi od predložene modelne funkcije je očitno.

## 4 SKLEP

Proctorjev preskus je osnova kontrole kvalitete vgradnje kamenih agregatov, zemljin in sekundarnih surovin v zemeljske objekte. Različni postopki obdelave pridobljenih podatkov lahko močno vplivajo na rezultat preskusa in s tem na kvaliteto izvedenih del na nekem zemeljskem objektu. Poenotenje načina obdelave je torej nujnost, ki zmanjšuje napake in prinaša večjo primerljivost med različnimi laboratoriji.

Predložena modelna funkcija (enačba 2) se je pri modeliranju nekaj sto rezultatov Proctorjevega preskusa različnih materialov (kamenih agregatov in zemljin) izkazala kot izredno uporabna. Ujemanja z eksperimentalnimi podatki so izredno dobra, večji odmiki pa nakazujejo napako pri izvedbi preskusa. Metoda modeliranja je ob uporabi osebnega računalnika zelo preprosta in omogoča direktni izračun maksimuma izrisane krivulje in s tem določitev maksimalne suhe zgoščenosti in optimalne vlažnosti preiskovanega materiala.

Modelna funkcija vsebuje šest parametrov, ki jih določimo v postopku modeliranja. Pomen posameznih parametrov v tem trenutku še ni znan, vendar obstajajo domneve, da omenjeni parametri vsebujejo posamezne karakteristike (zrnavost, oblika zrn, vrsta materiala, ...) preiskovanih materialov. Za ugotovitev pomena posameznega parametra modelne funkcije bo potrebna natančnejša obdelava čim večjega števila izvedenih preskusov kot tudi dodatno analitično raziskovalno delo.

## ZAHVALA

Avtorja se zahvalujeta ZAG Ljubljana za eksperimentalne podatke, na osnovi katerih so bila izvedena modeliranja, in za pomoč sodelavcev iz Geomehanskega laboratorija ZAG Ljubljana pri izvedbi dodatnih preiskav.

## 5 LITERATURA

- <sup>1</sup> K. H. Head, Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 1: Soil Classification and Compaction Tests, Pentech Press Ltd., 1984
- <sup>2</sup> R. D. Holtz, W. D. Kovacs, An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall Inc., 1981

<sup>3</sup>prEN 13286-2 Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 2: Test methods for laboratory reference density and moisture content - Proctor compaction, 1998

<sup>4</sup>J. N. Bronštejn, K. A. Semendjajev, Matematični priročnik, Življenje in tehnika, 1963