

Bojana DOLINAR  
mag., univ.dipl.inž.geol., Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo

## ANALIZA VZROKOV NAPAK PRI PREISKAVAH ZRNATOSTI VEZLJIVIH ZEMLJIN S POMOČJO DOLOČITVE MINERALNE SESTAVE

**POVZETEK:** Fizikalno mehanske lastnosti vezljivih zemljin, ki se določajo v mehaniki tal, temelijo na standardiziranih preiskavah, ki pa v posameznih primerih ne dajo zadovoljivega ali pričakovanega rezultata. Znano je, da lastnosti vezljivih zemljin v največji meri določajo glineni minerali, ki jih grade, zato je v takih primerih smiselno odgovore iskati prav z analizo vpliva posameznih mineralov v sestavi zemljine. V prispeku so povzete ugotovitve različnih raziskovalcev, ki se nanašajo na eksperimentalno določene vrednosti Atterbergovih mej židkosti, plastičnosti in indeksa plastičnosti za posamezne glinene minerale. Navedena preiska je izbrana zato, ker se lahko že na osnovi njenih rezultatov relativno dobro oceni tudi druge fizikalno mehanske lastnosti zemljine. V prispevku je podan tudi praktičen primer uporabe mineraloške analize pri iskanju vzrokov napak zrnatosti vezljivih zemljin vzorcev.

## REASONS FOR ERROR OCCURRENCE IN COHESIVE SOIL GRAIN SIZE EXAMINATION BASED ON THE DETERMINATION OF MINERAL COMPOSITION

**SUMMARY:** In soil mechanics, the physical mechanical properties of clay materials are determined by standard examinations. In some cases, however, the standard examination does not yield satisfactory or expected results. Since it is well known that the properties of cohesive soils mostly depend on the minerals they contain, it is only logical to analyse the influences of individual minerals in such cases. In the article are summarized the findings of some researchers which refer to the experimentally defined values of Atterberg's liquid limit, the plastic limit and the plasticity index for clay materials. The examination, discussed in this paper, was chosen because its results can be used for the estimation of all other physical and mechanical properties of soils. A practical example of using the mineralogical analysis for the occurrence of errors in the determination of the grain size of cohesive soil samples is included.

## UVOD

Geomehanske laboratorijske preiskave zajemajo vezljive in nevezljive zemljine ter kamnine. Cilj preiskav je poiskati njihove osnovne značilnosti, na osnovi katerih se uvrstijo v posamezne kategorije. V prispevku bodo obravnavane samo vezljive zemljine, kajti tu se pojavijo številni dejavniki, ki vplivajo na lastnosti in ponašanje takih materialov. Njihove fizikalno mehanske lastnosti zavisijo predvsem od vrste glinenih mineralov, vplivajo pa tudi neglinene in organske primesi, velikost in oblika zrn, stopnja kristaliničnosti in geološka zgodovina. Poznavanje vseh teh značilnosti omogoča lažje razumevanje in vrednotenje rezultatov geomehanskih laboratorijskih preiskav.

Velik vpliv glinenih mineralov na lastnosti vezljivih zemljin je poznan že dolgo. Terzaghi deli gline v tri osnovne skupine, to je montmorillonitne, kaolinitne in illitne. Podrobno opisuje oblike in velikosti njihovih zrn, strukture in stanja prisotne vode v njih ter s tem pojasnjuje pojave nabrekanja, kohezije itd.

Mnogi raziskovalci so proučevali vpliv posameznih glinenih mineralov na fizikalno mehanske značilnosti in prišli do zanimivih ugotovitev. Tako lahko danes, že samo s poznavanjem količinske mineralne sestave zemljin, sklepamo na mnoge njihove značilnosti.

Klub vsem tem spoznanjem se pri vsakdanjem delu v geomehanskih laboratorijih le redko upošteva rezultate mineraloških preiskav. To je tudi vzrok, da ostaja marsikatera nejasnost pri razumevanju rezultatov preiskav posameznih lastnosti zemljin.

## PLATIČNOST ZEMLJIN V ODVISNOSTI OD MINERALNE SESTAVE

Gline so v naravnem stanju plastične, kar pomeni, da jih lahko z uporabo sile deformiramo, ne da bi pri tem razpadle in obdržijo obliko tudi po prenehanju delovanja zunanje sile. Plastičnost glin je torej merilo za njihovo sposobnost oblikovanja. To je ena izmed najpomembnejših fizikalnih lastnosti glin.

Plastičnost glin je posledica kapilarnih sil, velikosti in oblike zrn in predvsem adsorpcijske sposobnosti glinenih mineralov. Za razumevanje teh pojavov je potrebno poznati njihovo kristalno strukturo.

V geomehaniki je plastičnost vezljivih zemljin podana z mejo plastičnosti ( $W_p$ ), mejo židkosti ( $w_L$ ) in indeksom plastičnosti ( $I_p$ ), določenimi po Atterbergovi metodi.

### Meja plastičnosti – $W_p$

Meja plastičnosti je za posamezne glinene minerale odvisna od vrste izmenjalnih kationov, neglinenih primesi, velikosti zrn in stopnje kristaliničnosti.

Po White-u (1949) ima najvišjo mejo plastičnosti attapulgit, sledi montmorillonit, nato halloysit, illit, dehidriran halloysit in kaolinit, kot je razvidno s preglednice 1.

**Preglednica 1.** Vpliv izmenjalnih kationov glinenih mineralov na njihove meje židkosti in plastičnosti

Izmen kation	GLINENI MINERALI											
	Montmori - llonit		Attapulgit		Illit		Kaolinit		Halloysit (2H <sub>2</sub> O)		Halloysit (4H <sub>2</sub> O)	
	$W_p$	$w_L$	$W_p$	$w_L$	$W_p$	$w_L$	$W_p$	$w_L$	$W_p$	$w_L$	$W_p$	$w_L$
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Ca <sup>++</sup>	63	177	124	232	40	90	36	73	38	54	58	65
Mg <sup>++</sup>	53	162	109	179	39	83	30	60	47	54	60	65
K <sup>+</sup>	60	297	104	161	43	81	38	69	35	39	55	57
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	60	323	97	158	42	82	34	75	32	43	56	61
Na <sup>+</sup>	97	700	100	212	34	61	26	52	29	36	54	56
Li <sup>+</sup>	60	600	103	262	41	68	33	67	37	49	47	49

Pri montmorillonitu je meja plastičnosti odvisna predvsem od vrste izmenjalnih kationov in je najvišja pri natrijevem in litijevem montmorillonitu. To je posledica velikega disperzijskega delovanja teh kationov, ki povzročijo cepitev delcev na velikosti, ki se približujejo velikosti osnovne celice. S tem se

poveča potencialna adsorpcijska površina in tako možnost vezanja vode. Ker natrijev in litijev kation ustvarjata zelo majhne privlačne sile med paketi, se lahko tvorijo debele plasti orientirane vode. Nasprotno pa ostali izmenjalni kationi, zaradi svojega velikega vezivnega delovanja, onemogočajo nastanek debelejših plasti vodnih filmov, zato so meje plastičnosti nekoliko nižje.

Visoke vrednosti mej plastičnosti za attapulgit so posledica njegove vlaknate strukture in velike sposobnosti vpijanja vode. Vrednosti se lahko spreminjači zaradi obdelave vzorca, kajti vlakna se med seboj pri pripravi vzorca zlahka ločijo.

Višje vrednosti mej plastičnosti pri halloysitu so posledica njegove kristalne strukture. Med posameznimi paketi nastopa voda v obliki urejene heksagonalne mreže, zaradi česar se posamezni paketi lažje ločijo. Pri računanju vrednosti konsistenčnih mej za halloysit je potrebno paziti na količino medpaketne vode, ki se sprosti že pri  $50^{\circ}\text{C}$ .

Pri illitu in kaolinitu, kjer je ionska izmenjalna kapaciteta veliko manjša kot pri montmorillonitu, je vpliv izmenjalnih kationov na meje plastičnosti majhen.

#### **Meja židkosti - $W_L$**

Podobno kot meje plastičnosti tudi meje židkosti niso za enake glinene minerale povsem enotne in se spreminjači zaradi različnih izmenjalnih kationov, neglinenih in organskih prmesi, velikosti zrn in stopnje urejenosti strukture.

Iz preglednice 1 je razvidno, da najvišje meje židkosti zasledimo pri natrijevem in litijevem montmorillonitu, nato attapulgitu, sledijo montmorilloniti, ki vsebujejo Ca, Mg,  $\text{NH}_4$  in K kot izmenjalni kation. Še nižje vrednosti mej židkosti so pri illitu, slabo kristaliziranem kaolinitu, halloysitu in na koncu dobro kristaliziranem kaolinitu.

Izredno visoke meje židkosti se kažejo pri montmorillonitu z natrijevim in litijevim izmenjalnim kationom. Vrednosti teh mej je skoraj nemogoče določiti zaradi pojava tiksotropije.. Ker razvoj tiksotropije zahteva določen čas, ki je pri različnih vzorcih montmorillonita različen, se tudi meje židkosti spreminjači s časom. Montmorilloniti z ostalimi izmenjalnimi kationi imajo približno polovico manjše vrednosti mej židkosti.

Velik vpliv izmenjalnih kationov se na meje židkosti kaže tudi pri attapulgitu medtem, ko so te vrednosti pri ostalih glinenih mineralih manjše in niso odvisne od prisotnih izmenjalnih kationov. Za illit in kaolinit velja, da se meje židkosti spreminjači v glavnem v odvisnosti od stopnje kristaliničnosti in velikosti zrn.

Konsistenčne meje se lahko zelo spreminjači tudi zaradi sušenja vzorcev. Pri sušenju se delci glinenih mineralov zelo približajo in ob ponovnem namakanju voda zelo težko prodre mednje. Zaradi odstranitve vode lahko pride celo do porušitve strukture in s tem izgube plastičnosti.

#### **Indeks plastičnosti - $I_P$**

Po Grim-u (1962) se indeks plastičnosti za glinene minerale spreminja od 600 za natrijev montmorillonit do 1 za kaolinit.

Izjemno visoke vrednosti indeksa plastičnosti (300 – 600) kažeta natrijev in litijev montmorillonit. Pri ostalih izmenjalnih kationih je ta vrednost 50 – 300, najčešče 75 – 125.

Indeks plastičnosti za attapulgit se giblje med 57 in 123, za allophane med 76 in 95 in za illit med 23 in 50. Pri kaolinitu in kloritu se indeks plastičnosti spreminja od 1 do 40, odvisno predvsem od stopnje kristaliničnosti. Za halloysit so te vrednosti med 2 in 16.

Glede na dejstvo, da na fizikalno mehanske lastnosti vezljivih zemljin vplivajo že zelo majhne količine glinenih mineralov, je zelo pomembno, da so mineraloške analize izvršene v celoti in ne samo določene prevladujoče sestavine, ker je lahko v tem primeru rezultat zavajajoč.

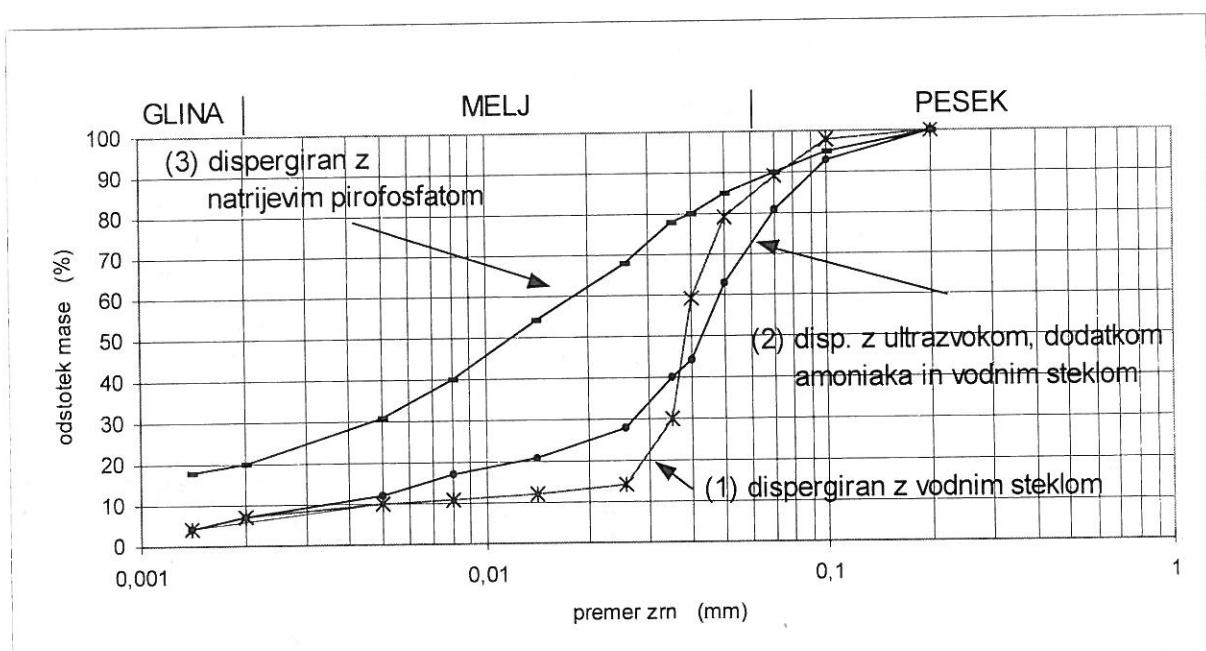
### **PRIMER UPORABE MINERALOŠKE ANALIZE PRI ISKANJU VZROKOV NAPAK ZRNATOSTI VEZLJIVIH ZEMLJIN**

Na štirih vzorcih zemljin, odvzetih z območja porečja Mure, smo za primerjavo izvršili preiskave zrnatosti in istočasno konsistenčnih mej po Atterbergu.

Pregled rezultatov določitve Atterbergovih mej je pokazal, da vzorci pripadajo visoko plastičnim glinam in meljem ter nizko plastičnim meljem z indeksi plastičnosti med  $I_p = 13,3\%$  in  $37,0\%$ . Nasprotno pa so rezultati analiz zrnatosti kazali na zelo podobne materiale z zrni velikosti  $0,02\text{ mm} - 0,06\text{ mm}$  ( $70\% - 80\%$ ) in glinaste frakcije manj kot  $7\%$ . Analize so bile izvršene z areometrično metodo ob uporabi vodnega stekla za dispergiranje posameznih zrn zemljin.

Primerjava rezultatov preiskav Atterbergovih mej in zrnatosti je pokazala, da se je v analizah pojavila napaka, saj dobljene vrednosti nikakor niso bile združljive. Kljub različni plastičnosti preiskovanih zemljin, so preiskave njihove zrnatosti pokazale praktično enake rezultate. Ob predpostavki, da je večja verjetnost napake pri določanju zrnatosti zemljin, je bila le ta ponovno opravljena. Tokrat so bili vzorci predhodno dispergirani z ultrazvokom in kuhanjem z dodatkom amoniaka. Kot disperzijsko sredstvo je bilo uporabljeno vodno steklo –  $\text{Na}_2\text{SiO}_4$ . Rezultati preiskav zrnatosti so pokazali, da so tokrat deleži posameznih frakcij drugačni, vendar še vedno neskladni s preiskavami plastičnosti istih zemljin. Vzroke je bilo zato potrebno poiskati v sestavi zemljin.

Krivulji zrnatosti, določeni v prvem in drugem primeru preiskav, sta za vzorec z oznako 1 prikazani na sliki 1.



Slika 1. Krivulje zrnatosti vzorca 1: (1) brez predhodnega dispergiranja z uporabo vodnega stekla; (2) s predhodnim dispergiranjem z ultrazvokom in kuhanjem z dodatkom amoniaka in uporabo vodnega stekla; (3) brez predhodnega dispergiranja z uporabo natrijevega pirofosfata kot disperzijskega sredstva

Mineralna sestava je bila določena z optično mikroskopskimi preiskavami in rentgenskim difraktometrom z žarkovjem  $\text{CuK}\alpha$  ob uporabi nikljevega filtra, proporcionalnega števca in grafitnega monokromatorja. Za pregledno določitev mineralne sestave so bili uporabljeni vprašeni vzorci, za določitev glinenih mineralov pa usmerjeni preparati, iz katerih je bil, po nasičenju z glikolom, dokazan tudi Ca montmorillonit.

V vzorcih so se v največji meri pojavljali kremen, kalcit, dolomit in muskovit medtem, ko so plagioklazi, mikroklin in pirit zastopani v manjši količini. Med glinenimi minerali je bil določen illit in Ca montmorillonit.

Vrsta in količina posameznih mineralov v preiskovanih zemljinah je prikazana na preglednici 2.

**Preglednica 2.** Mineralna sestava vzorcev in Atterbergove konsistenčne meje

Mineralna sestava (%)	Oznaka vzorca			
	1	2	3	4
Kremen	32	10	13	20
Kalcit		30	14	14
Dolomit		19	24	21
Muskovit – illit	23	25	25	23
Klorit	13	9	12	12
Plagioklaz	12	x	6	5
Mikroklin	8			
Pirit		3		x
Ca - montmorillonit	12		6	5
<b>Atterbergove meje</b>				
W <sub>P</sub> (%)	25,4	30,2	31,6	30,8
W <sub>L</sub> (%)	62,4	43,5	65,9	57,8
I <sub>P</sub> (%)	37,0	13,3	34,3	26,0
Klasifikacija	CH	MI	CH - MH	MH

Iz zbranih podatkov zrnatosti, plastičnosti in mineralne sestave vzorcev smo prišli do naslednjih zaključkov.

Pri določanju zrnatosti zemljin so se večje napake pojavljale pri zelo stisljivih glinah in meljih. Tej skupini so pripadali trije izmed štirih vzorcev, ki smo jih mineraloško analizirali. Njihove krivulje zrnatosti, določene po standardiziranem postopku, so pokazale zelo enakomerno zrnate zemljine z velikostmi zrn med 0,02 mm in 0,06 mm.

Iz ponovljenih preiskav zrnatosti, pri katerih so bile zemljine predhodno dispergirane z ultrazvokom in kuhanjem z dodatkom amoniaka, je bilo vidno, da je bila nepravilna predhodna priprava vzorcev razlog napačne določitve zrnatosti. Vendar tudi krivulje zrnatosti bolje dispergiranih vzorcev niso povsem ustrezale rezultatom preiskav plastičnosti teh zemljin, zato smo vzroke iskali v mineralni sestavi.

Rentgenska in optično mikroskopska preiskava mineralne sestave sta pokazali, da vzorci vsebujejo predvsem kremen, karbonate, klorit, muskovit, glinence in glinene minerale. Pirit se je pojavil v manjših količinah.

Za zrna kremena, karbonatov in muskovita je značilno, da imajo majhno specifično površino in površinsko aktivnost in zato nizko plastičnost. Bolj zanimivi so glineni minerali ki lahko, zaradi svojih posebnih lastnosti, bistveno vplivajo na značilnosti celotne zemljine. Zato smo skušali neskladja rezultatov preiskav plastičnosti in zrnatosti pojasniti z lastnostmi teh mineralov.

Predpostavili smo, da je v vzorcih prisoten montmorillonit v večjih količinah. Znano je, da zrna montmorillonita tvorijo skupke, ki jih je težko razbiti in bi zato lahko nastopal v večjih zrnih. V primeru, da bi bile krivulje zrnatosti bolje dispergiranih vzorcev pravilno določene, bi bile visoke vrednosti konsistenčnih mej posledica prisotnosti montmorillonita. Rentgenska preiskava z glikolom nasičenih usmerjenih preparatov je pokazala, da se Ca montmorillonit pojavlja skoraj v vseh vzorcih, vendar v premajhnih količinah, da bi mogel na opisan način vplivati na rezultate preiskav zrnatosti.

Vzrok napačnega določanja zrnatosti zemljin, zaradi prisotnosti visoko plastičnega minerala glin, bi bil lahko tudi pojav kosmičenja v suspenziji. Znano je, da se kosmiči pojavijo kot posledica električnih ali kemičnih vplivov. Za vse glineni minerale je značilno, da so njihovi delci rahlo negativno nabiti, zaradi česar lahko vežejo posamezne ione, vodo ali organske tekočine. Električno polje, ki se ustvari okoli nabitih delcev, se spreminja z razdaljo od njihove površine in je odvisno od koncentracije, valence, dielektrične konstante in temperature. Med delci v elektrolitu vladajo tako privlačne kot odbojne sile. Rezultanta obeh sil je njuna algebraična vsota. V primeru, ko prevladujejo odbojne sile, se posamezni delci dispergirajo. Kadar je rezultanta obeh sil privlačna sila, nastopi pojav kosmičenja. Stopnja kosmičenja je torej odvisna od vrste in koncentracije ionov v porni vodi. Preprečimo jo lahko z

dodatkom disperzijskega sredstva, ki ustvari okoli posameznih zrn ovoj in s tem onemogoči delovanje električnih nabojev in kemične reakcije v suspenziji. Na tak način se dobi snov, katere stabilnost ni odvisna od prvotne sestave ionov.

Ker lahko pojav kosmičenja povzroči velike napake pri merjenju gostote suspenzije, smo predpostavili, da je lahko tudi to vzrok nepravilnosti areometričnih preiskav obravnavanih vzorcev. Pri natančnem opazovanju suspenzije preiskušanih zemljin smo ugotovili, da kljub dodanemu vodnemu steklu najverjetneje res nastopi pojav kosmičnja. Za primerjavo smo nato merili gostoto suspenzije brez dodanega disperzijskega sredstva in ugotovili, da so razlike v obeh primerih neznatne. To je pomenilo, da vodno steklo ni bilo učinkovito in smo zato poskušali še z menjavo reagenta. Izbrali smo natrijev pirofosfat ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ) in ponovno izvršili areometrične analize. Rezultat je bil presenetljiv, saj so se pri vzorcih z oznakami 1, 3 in 4, ki so vsebovali 5 % - 12 % Ca montorillonita, pokazale popolnoma drugačne velikosti in razporeditve zrn medtem, ko pri vzorcu 2 takih razlik ni bilo. V slednji zemljini se Ca montmorillonit ni pojavljal. Krivulje zrnatosti tako dispergiranih vzorcev so veliko bolj ustrezale rezultatom preiskav plastičnosti. Primer za vzorec 1 je prikazan na sliki 1.

## ZAKLJUČEK

Znano je, da rezultati določevanja fizikalno mehanskih lastnosti vezljivih zemljin zavise od številnih dejavnikov, kot so odvzem in priprava vzorcev, mineralna sestava in ne nazadnje tudi način dela in subjektivna ocena raziskovalca. Mnogokrat je rezultate preiskav nemogoče vskladiti med seboj in izločiti morebitno nepravilno dobljene vrednosti. Zato mnogi raziskovalci iščejo možnosti in načine, kako oceniti in pravilno ovrednotiti določene fizikalno mehanske lastnosti zemljin.

Ker so lastnosti vezljivih zemljin odvisne predvsem od vrste in deleža glinenih mineralov, bi bilo smotorno ocenjevati rezultate preiskav tudi na osnovi njihove mineralne sestave. To je bilo tudi osnovno vodilo tega dela, čeravno smo se tokrat omejili le na prikaz praktičnega pomena mineraloških analiz v primeru iskanja vzrokov napak, ki se pojavljajo pri preiskavah zrnatosti vezljivih zemljin. V izvedenih preiskavah zrnatosti so se napake pojavile pri treh od štirih izbranih vzorcev zemljin. Razmeroma dobro določena je bila le zrnatost v vzorcu, ki po podatkih mineraloških analiz ni vseboval visoko plastičnega Ca montmorillonita. Menimo, da je prav prisotnost slednjega povzročila nastanek aluminijevih ali kalcijevih hidroksidov, ki v suspenziji tvorijo kosme. Za preprečitev tega pojava je potrebno izbrati primerno disperzijsko sredstvo.

V prihodnje bi bilo zelo zanimivo in koristno sistematično proučevati vplive posameznih mineralov in njihovih zmesi na lastnosti zemljin, ki jih preiskujemo v mehaniki tal. Podatki iz literature kažejo na takšne poskuse posameznih raziskovalcev, vendar kljub temu ostaja na tem področju še veliko neznanega.

## LITERATURA

- (1) Birrel, K. (1952). Physical properties of New Zealand volcanic ash soil, Conference on shear testing of soils, 30-34, Melbourne
- (2) Brown, G. (1972). The X ray identification and crystal structures of clay minerals. Jarrold and Sons, 544 p., London
- (3) Carrier, W. D. (1985). Consolidation parameters derived from index test. Geotechnique, 35/2, 211-213, London
- (4) Grim, R. E. (1962). Applied clay mineralogy. Mineralogical Society, Spottiswode Ballantine Ltd., 495 p., London
- (5) Kezdi, A. (1980). Soil testing, Vol.2, Elsevier Scientific Publ. Comp., 258 p., Budapest
- (6) Lambe, T. W., Martin, R. T. (1955). Composition and engineering properties of soils, (III), Proc. U.S. Highway Research Board, 34, 576-590, New York
- (7) Mielenz, R. C., King, M. E. (1955). Physical – chemical properties and engineering performance of clays. Calif. Div. Mines Bull. 169, 196 – 254, Los Angeles
- (8) White, W.A. (1949). Atterberg plastic limits of clay minerals. Am. Mineralogist, 34, 508-512, New York