

# Seisminės skersinės bangos greičio modeliavimas grunte panaudojus ekstremalųjį apmokymo algoritmą

Donatas Urbaitis,

Audrius Indriulionis,

Robert Mokrik,

Juozas Kastytis Dundulis

Vilniaus universitetas,  
M. K. Čiurlionio 21/27,  
LT-2009 Vilnius  
El. paštas donatas.urbaitis@gf.vu.lt

Urbaitis D., Indriulionis A., Mokrik R., Dundulis J. K. Seisminės skersinės bangos greičio modeliavimas grunte panaudojus ekstremalųjį apmokymo algoritmą. *Geologija. Geografija*. 2016. T. 2(2). ISSN 2351-7549.

Dirbtiniai neuroniniai tinklai vis dažniau taikomi ne tik diagnostikos, finansų, kontrolės, kompiuterinės grafikos srityse, bet ir inžinerinėje geologijoje. Šiame darbe tyrinėjant Lietuvos gruntų stipruminių savybių rodiklius pirmą kartą buvo panaudotas dirbtinių neuroninių tinklų apmokymo metodas. Tyrimui pasirinktas Stabatiškės aikštelės moreninis molinis gruntas. Aikšteleje atlikti statinio zondavimo bandymai, skirti nustatyti sąlyginį gruntų stiprumą. Taip pat įvertinti gruntų skersinės bangos greičiai ( $V_s$ ). Apmokant neuroninį tinklą buvo panaudotas ekstremalaus apmokymo algoritmas ELM (*Extreme learning machine*), optimizuojant duomenis – stochastiniai paieškos metodai, kuriais randamas globalus funkcijos minimumas ar maksimumas. Modeliuojant panaudotas diferencialinio skirtumo (DE) algoritmas. Pradiniai įvesties į modelį duomenys: koreguotas kūginis stipris ( $q_c$ ), šoninės trinties stipris ( $f_s$ ), trinties santykis ( $R_f$ ), vertikalus geostatinis slėgis ( $\sigma$ ), vertikalus efektyvus geostatinis slėgis ( $\sigma'$ ) ir poringumo koeficientas ( $e$ ), o ieškomas parametras – skersinės bangos greičiai ( $V_s$ ). Atlikus modeliavimą sudaryti prognoziniai seisminių bangų greičių analogai, kurie leidžia įvertinti gruntų dinaminių savybių rodiklius neatliekant pačio seisminio bandymo.

**Raktažodžiai:** ekstremalaus apmokymo algoritmas (ELM), skersinės bangos greitis, neuroninis tinklas, moreninis gruntas, kūginis stipris ( $q_c$ )

## ĮVADAS

Projektuojant šiuolaikinius inžinerinius statinius, kuriuos veikia išoriniai dinaminiai arba pačių statinių sukelti vibraciniai poveikiai, būtina įvertinti šių poveikių įtaką būsimam statiniui, jo pagrindui bei statinio ir pagrindo sąveikai. Todėl atliekant tokių statinių, pavyzdžiui, atominės elektrinės, vėjo jėgainės ir kt., kurie yra veikiami dinaminių apkrovų, visada turi būti įvertinamas žemės drebėjimų, vėjo ir bangų įrenginių vibracijos poveikis, gruntų praskydimo potencialas (Youd, Idriss, 2001; Massarsch, 2004). Lietuvoje, kaip ir visoje Europos Sąjungoje, pradėjus naudoti norminius dokumentus LST EN 1997-1:2006 ir LST EN 1998-5:2005,

kurie skirti tiek tyrinėtojams, tiek pamatų projektuotojams, susiduriama su rečiau inžinerinėje geologijoje naudojamais gruntų rodikliais (šlyties modulis prie labai mažų deformacijų ( $G_{max}$ ) arba ( $G_0$ ) ir Puasono koeficientas ( $\nu$ )). Šie rodikliai reikalingi projektuojant statinius, veikiamus dinaminių apkrovų. Juos galima nustatyti netiesiogiai atliekant bandymus laboratorijoje, taip pat ir tiesiogiai atliekant bandymus lauko sąlygomis (Luna, Jadi, 2000). Mažų deformacijų šlyties modulis dažniausiai siejamas su mažomis deformacijomis, siekiančiomis  $10^{-3}$  % arba mažiau (Wair ir kt., 2012). Skersinės bangos greitis ( $V_s$ ) yra svarbus rodiklis nustatant maksimalų šlyties modulį ( $G_{max}$ ). Įvairiais tyrimais nustatyta, kad maksimalus šlyties

modulis  $G_{\max}$  yra funkcija, priklausanti tiek nuo įtempio būvio, tiek nuo grunto struktūros (Hardin, 1978; Roesler 1979; Yu, Richart, 1984; Stokoe ir kt., 1985).

Šiuos dinامينius gruntų rodiklius galima sužinoti nustatius skersinių  $V_s$  ir išilginių  $V_p$  bangų greičius. Maksimalus šlyties modulis  $G_{\max}$  tiesiogiai priklauso nuo grunto tankio  $\rho$  ir skersinės bangos sklidimo greičio  $V_s$ :

$$G_{\max} = \rho * V_s^2,$$

kur  $G_{\max}$  – šlyties modulis prie labai mažų deformacijų,

$\rho$  – gamtinis tankis,

$V_s^2$  – skersinės bangos greitis.

Skersinei bangai nustatyti yra daugybė lauko tyrimų metodų, o gamtiniam tankiui nustatyti naudojamas gama–gama spinduliuotės metodas arba atliekami bandymai laboratorijoje iš nesuardytos sandaros grunto ėminių. Galima teigti, kad skersinės bangos greitis priklauso nuo grunto sudėties, fizinės būklės, formavimosi sąlygų šiandieninės ir geologinėje praeityje buvusios įtempimų būsenos.

Paskutiniaisiais dešimtmečiais iš lauko tyrimo metodų populiariausi ir dažniausiai taikomi tie, kurie yra greiti, palyginti pigūs, leidžia tirti visą grunto storumę nepertraukiamai. Šie metodai padeda gauti visą kompleksą inžinerinių geologinių duomenų informacijos. Vienas iš tokių metodų yra statinis zondavimas (Gadeikis ir kt., 2012). Norint sužinoti dinامينius geotechninius rodiklius reikia naudoti kitus lauko tyrimo metodus, jie yra sudėtingesni ir ekonominiu požiūriu brangesni, palyginti su statiniu zondavimu. Šio darbo tikslas – taikant neuroninius tinklus sukurti modelį, kuris apjungtų statinio zondavimo metu gautus rezultatus, fizinį grunto būvį ir kartu su seisminių bangų greičiais leistų įvertinti skersinės bangos sklidimo greičius neatliekant pačio bandymo.

Tyrimų objektas – viršutinio Pleistoceno moreninis gruntas. Lauko tyrimai atlikti Stabatiškės aikštelėje (1 pav.), kurioje vyrauja moreninis gruntas su smėlio lėšiais ir tarpfluoksniais. Atliekant lauko tyrimus buvo gręžiami gręžiniai ir paimti grunto pavyzdžiai, siekiant apibūdinti tiriamąjį gruntą, atlikta grunto granulimetrinė analizė hidrometro metodu, gamtinio tankio nustatymas ir konsistencijos ribų įvertinimas.



1 pav. Tyrimų objekto vieta (Stabatiškės)

Fig. 1. Location of the study site (Stabatiškės)

## DARBO METODIKA

Skersinės bangos greitis  $V_s$  yra nustatomas tiek laboratoriniais, tiek lauko metodais. Pagrindiniai laboratoriniai  $V_s$  nustatymo metodai yra rezonansinės kolonos (*resonant column*), ciklinis sukamasis kirpimas (*torsional shear*) ir pjezo-keraminės plokštelės (*bender elements*) panaudojimas triašio slėgio prietaisuose sukeltant virpesius bandinyje, esant norimam slėgimui. Šie bandymai atliekami prie labai mažų deformacijų ( $<10^{-3}$ – $10^{-4}$  %) bandinio viduje ir jo centre (Woods, Henke, 1981; Woods, 1994). Atlikdami šiuos bandymus mes galime kontroliuoti įvairiausias bandinio sąlygas, stengtis sukurti kuo panašesnę gamtinę būklę. Tačiau iškyla nemažai problemų:

- a) gauti rezultatai neatspindės *in-situ* sąlygų;
- b) idealiai paimti nesuardytos sandaros bandinį, ypač iš moreninių gruntų, praktiškai neįmanoma;
- c) paimto nesuardytos sandaros bandinio pažeidimai konservavimo, transportavimo, atstatymo į gamtines sąlygas metu negrįžtamai keičia jo įtempimų būseną.

Dėl šių priežasčių galutiniai laboratorinių tyrimų rezultatai ne visada atspindi tikrąsias grunte buvusias sąlygas. Todėl dažniausiai bangų sklidimo greičiai nustatomi lauko sąlygomis. Plačiausiai taikomi šie lauko geofiziniai metodai: seismika gręžiniuose, seisminiai bandymai tarp dviejų gręžinių, atsispindėjusių ir lūžtančių bangų metodas, paviršinių bangų spektrinė analizė (SASW). Naudojant geofizinius lauko metodus susiduriama su

tam tikromis problemomis. Šiais metodais nustatomi bangų greičiai palyginti dideliame masyve, tačiau tikrosios gruntų geotechninių savybių rodiklių vertės bei masyvo geologinė sandara vertinama tik pagal atskirų gręžinių duomenis arba paimtų bandinių savybes.

Pastaraisiais dešimtmečiais labai populiarūs tampa metodai, sutapatinantys gruntų savybių tyrimus masyve (statisis zondavimas CPT, dilatometrini bandymas DMT) su lygiagrečiai atliekamais seisminių bangų sklidimo greičio matavimais (*seismic cone penetration test* (SCPT), *seismic dilatometric test* (SDMT)). Šių metodų ypatumas, kad prie įprastinės CPT ar DMT įrangos yra montuojamas specialus priedėlis – seisminis modulis. Šis modulis sudaro galimybę šalia tradicinių rodiklių – kūginio stiprio  $q_c$ , šoninės trinties  $f_s$  bei porinio slėgio  $u$  ir DMT metu gaunamų rodiklių matuoti ir seisminių bangų sklidimo greičius  $V_s$  (Gadeikis ir kt., 2013).

SDMT – tai plokščiojo dilatometro (DMT) ir seisminio priedėlio, kuriuo galima registruoti skersinės bangos greitį, derinys. Tai zondas, kuriame 0,5 m atstumu vienas nuo kito yra įmontuoti du imtuvai (geofonai). Jais galima labai tiksliai išmatuoti skersinės bangos greitį (Marchetti, 2008). Šio bandymo metu buvo naudojama metalinė horizontali plokštė, tvirtai prispausta naudotos technikos prie išlyginto žemės paviršiaus, kad būtų gautas didžiausias susidariusių bangų jautrumas (2 pav.). Skersinės bangos greitis nustatomas kaip santykis tarp skirtingų atstumų – bangos šaltinio ir imtuvų (S2-S1) bei uždelsimo ( $\Delta t$ ) tarp atvykstančio impulso nuo pirmojo geofono (G1) iki antrojo (G2). Matavimai atliekami kas 0,5 m.

Kartu su seisminiais bandymais buvo atliktas statinis zondavimas su porinio slėgio matavimu CPTu. Metodo esmė – zondas naudojant statinę jėgą vienodu greičiu gilinamas išspraudžiant strypus (prie kurių pritvirtintas zondas) į grunto masyvą. Šio bandymo metu matuojamas zondo antgalio (kūgio) pasipriešinimas smigimui  $q_c$ , zondo cilindrinio paviršiaus trintis  $f_s$  ir atskirais atvejais, taikant specialius daviklius, galima matuoti grunto porinį slėgį  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  (Gadeikis ir kt., 2012).

Nustačius tyrimų aikštelėje statinio zondavimo ir skersinės bangos greitį, papildomai laboratorijoje atlikti bandymai iš surinktų pavyzdžių siekiant identifikuoti gruntą ir jo fizinę būklę.



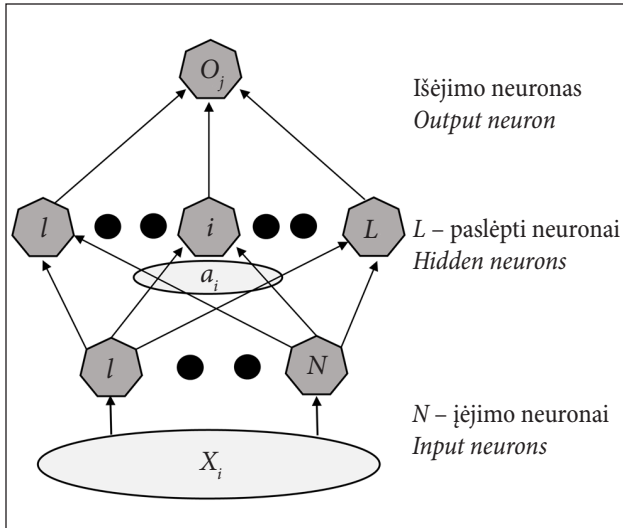
2 pav. Seisminio dilatometro bandymas tyrimų aikštelėje  
Fig. 2. Seismic dilatometer test (SDMT) at site

Šiame darbe tyrinėjant Lietuvos gruntų stipruminių savybių rodiklius pirmą kartą panaudotas neuroninių tinklų apmokymo metodas – ekstremalaus apmokymo algoritmas, o optimizuojant duomenis – stochastiniai paieškos metodai, kuriais randamas globalus funkcijos minimumas ar maksimumas. Modeliuojant panaudotas diferencialinio skirtumo (DE) algoritmas. Pradiniai įvesties į modelį duomenys: koreguotas kūginis stipris ( $q_t$ ), šoninės trinties stipris ( $f_s$ ), trinties santykis ( $R_\rho$ ), vertikalus geostatinis slėgis ( $\sigma$ ), vertikalus efektyvus geostatinis slėgis ( $\sigma'$ ) ir poringumo koeficientas ( $e$ ), o ieškomas parametras – skersinės bangos greitis ( $V_s$ ). Atlikus modeliavimą sudaryti prognoziniai seisminių bangų greičių analogai, kurie leidžia įvertinti gruntų dinaminių savybių rodiklius neatliekant pačio seisminio bandymo.

## MATEMATINIS MODELIS

3 pav. pateiktas standartinis paprastojo vieno sluoksnio neuroninis tinklas.

Tarkime, kad turime  $N$  skirtingų imčių  $(x_p, t_p)$ , kur  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T \in \mathbb{R}^n$ , ir  $t_i = [t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{im}]^T \in \mathbb{R}^m$  yra vieno sluoksnio FFNN su  $L$  paslėptų neuronų ir



3 pav. Paprastojo vieno sluoksnio neuroninio tinklo pavyzdys

Fig. 3. Example of a single layer Feedforward Neural Network

aktyvavimo funkcija  $g_i(x)$ , ji matematiškai modeliuojama:

$$\sum_{i=1}^L \hat{a}_i g_i(x_j) = \sum_{i=1}^L \hat{a}_i g_i(w_i \cdot x_j + b_i) = o_j,$$

kur kinta  $j = 1, \dots, N$   $g_i(x)$  – aktyvavimo funkcija, kuri gali būti skirtinga: tiesinė, sigmoidas ir tangentinė;  $w_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}]^T$  – svorių vektorius, sujungtas su  $i$ -uoju paslėptu neuronu ir įėjimais;  $\beta_i = [\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{im}]^T$  – svorių vektorius, sujungtas su  $i$ -uoju paslėptu neuronu ir išėjimu;  $b_i$  –  $i$ -ojo paslėpto neuroso poslinkis bei skaliarinė sandauga, žymėsime  $w_i \cdot x_j$  išėjimus, susietus su paslėpto sluoksnio neuronais tiesine funkcija.

Standartinėje FFNN skaičiavimo schemoje su  $L$  paslėptų neuronų ir aktyvavimo funkcija  $g_i(x)$  galime aproksimuoti  $N$  imtis taip, kad  $\sum_{j=1}^L \|o_j - t_j\| = 0$ , t. y. egzistuoja tokie  $\beta_p, w_p, b_p$ , kad

$$\sum_{i=1}^L \hat{a}_i g_i(x_j) = \sum_{i=1}^L \hat{a}_i g_i(w_i \cdot x_j + b_i) = t_j, j = 1, \dots, N.$$

Pateiksime matricinę  $N$  lygčių formą  $H\beta = T$ :

$$H(w_1, w_2, w_L, b_1, b_2, b_L, x_1, x_2, x_n) =$$

$$\begin{bmatrix} q(w_1 \cdot x_1 + b_1) \cdot g(w_L \cdot x_1 + b_L) \\ q(w_1 \cdot x_n + b_1) \cdot g(w_L \cdot x_n + b_L) \end{bmatrix},$$

$\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)_{L \times m}$ ,  $T = (t_1, t_2, \dots, t_L)$ , vadinamosios Huang (Huang, Babri, 1998; Huang, 2003), yra neuroninio tinklo paslėpto sluoksnio išėjimų matrica.  $H$  matricos  $i$ -asis stulpelis – vadinamasis  $i$ -ojo neuroso išėjimas su atitinkamais įėjimais  $(x_1, x_2, x_L, \dots)$ . Visada aktyvavimo ir perdavimo funkcija yra be galo diferencijuojama, o imčių skaičius žymiai didesnis nei paslėptų neuronų skaičius  $L \ll N$ .

Ekstremalaus apmokymo algoritmas (ELM) susideda iš kelių pagrindinių žingsnių:

1. Atsitiktinai priskirti įėjimo svorius  $w_i$  ir  $b_p$ , kur  $i = 1, \dots, L$ .
2. Suskaičiuojama paslėpto sluoksnio išėjimo matrica  $H$ .

3. Suskaičiuojami išėjimo svoriai  $\beta: \beta = H^+T$ , kur  $T = [t_1, t_2, \dots, t_N]^T$ .

Turime šias svarbias savybes:

*Minimali apmokymo paklaida.* Specialus sprendinys  $\beta^* = H^+T$  yra vienas iš mažiausių pagrindinės lygčių sistemos  $H\beta = T$  kvadratų sprendinių, siekiant mažiausios apmokymo paklaidos, kai:

$$\|H\beta - T\| = \|HH^+\beta - T\| = \|H\beta - T\|.$$

Visais apmokymo algoritmais siekiama gauti mažiausią apmokymo paklaidą, tačiau dauguma to negali pasiekti dėl lokalaus minimumo arba be galo didelio iteracijų skaičiaus.

*Mažiausia svorių norma.* Specialus sprendinys  $\beta^* = H^+T$  turi mažiausią normą visiems mažiausių kvadratų sprendiniams  $H\beta = T$

$$\|\beta^*\| = \|H^+T\| \leq \|\beta\|, \forall \beta \in$$

$$\{\beta: \|H\beta - T\| \leq \|H\beta - T\|, \forall z \in \mathbb{R}^{L \times N}\}.$$

*Minimali  $H\beta = T$  mažiausių kvadratų sprendinio norma yra vienintelė  $\beta^* = H^+T$ .*

Perdavimo ir aktyvavimo funkcija  $g(x)$  yra be galo diferencijuojama, ji gali būti sigmoidinė, radialinė bazinė, kosinusinė, sinusinė, eksponentinė ir t. t. (Huang, Babri, 1998), taip pat imčių skaičius žymiai didesnis nei paslėptų neuronų skaičius  $L \ll N$ . Kai kurie darbai (Huang, 1998a, 2003b; Huang, Babri, 1998; Ferrari, Stengel, 2005) parodo, kad FFNN su  $N$  paslėptų neuronų skaičiumi gali išmokyti  $N$  skirtingų stebėjimų.

Norėdami gauti neuroninio tinklo struktūrą, kuri bus parenkama Evoliucinių algoritmų pagalba,

turime rasti šiuos neuroninio tinklo struktūros komponentus:

1. Įėjimų skaičių.
2. Paslėptų sluoksnių ir neuronų skaičių.
3. Perdavimo funkcijas.
4. Išėjimų skaičiaus ir jos perdavimo funkcijas.

Modeliavime panaudotas diferencialinio skirtumo (DE) algoritmas.

## REZULTATAI

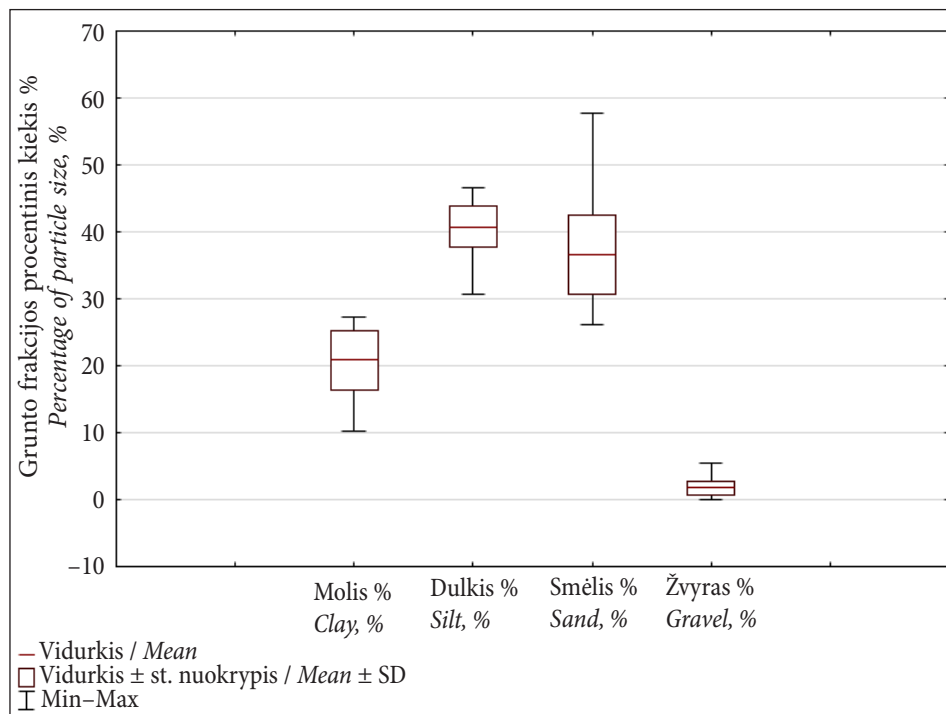
Laboratoriniais tyrimais nustatyta: granulimetrinė grunto sudėtis (hidrometro metodu), grunto konsistencijos ribos, gamtinis tankis ir gamtinis drėgnis. Atlikus granulimetrinę analizę nustatyta, kad gruntas pagal granulimetrinę sudėtį yra šiek tiek žvyringas smėlingas dulkingas molis (4 pav.). Grunto pavadinimas suteiktas pagal LST EN ISO 14688-2:2004. Nustatyta, kad tirtajame grunte labiausiai kaiti yra smėlio frakcija (dalelių dydis – 0,063–2,0 mm), kuri kinta nuo 26,1 iki 57,8 %, o vidurkis – 36,6 %. Žvyro frakcija (dalelių dydis >2,0 mm) grunte yra išlaikyta ir kinta nedideliame intervale – nuo 1,5 iki 2,8 % ir tik retais atvejais viršija 3 %. 4 pav. matome, kad grunto tipizavimas yra būtinas norint gauti modeliuojant kuo tikslesnius rezultatus, nes gruntų

frakcijų kaita, ypač smėlio ir molio, yra ryški.

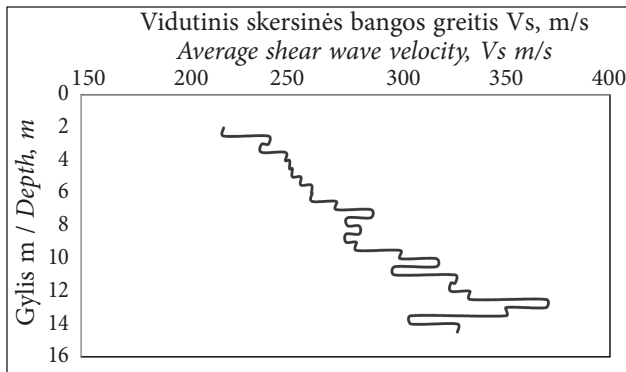
Tiriamasis gruntas pagal fizinių būvį yra mažo poringumo, poringumo koeficientas ( $e$ ) kinta nuo 0,29 iki 0,42 (vidurkis – 0,37), grunto konsistencija kinta nuo standžios iki labai standžios ( $I_c$  – 0,859–1,198). Gamtinis drėgnis ( $w$ ) – nuo 0,100 iki 0,151 (vidurkis – 0,133), o gamtinis tankis ( $\rho$ ) – nuo 2,19 iki 2,31 Mg/m<sup>3</sup>, vidutinis – 2,23 Mg/m<sup>3</sup>.

Tyrimų teritorijoje atlikus seisminio dilatometro bandymus nustatyta, kad skersinės bangos greitis kinta nuo 168 iki 370 m/s (5 pav.). Jos greičiai buvo nustatyti pagal kryžminės (susikertančios) koreliacijos algoritimą. Siekiant įvertinti gautų rezultatų tikslumą, tame pačiame gylyje bandymas buvo pakartotas nuo 3 iki 5 kartų. Gauti itin maži skersinės bangos skirtumai tame pačiame gylyje – nuo 1 iki 3 %.

Šalia seisminio zondavimo buvo atliktas statinis zondavimas su porinio slėgio matavimu. Iš viso atlikti 7 poriniai bandymai SDMT ir CPTu. Statinio zondavimo metu papildomai fiksuotos porinio slėgio vertės, kad būtų galima patikslinti užfiksuotą kūginį stiprį. Dėl aukšto gruntinio vandens lygio (~0,3–1,0 m gylyje) ir vietomis gausių vandeningų smėlio lęšių kai kuriose tyrimo vietose porinis slėgis sąlyginai buvo mažas (0–100 kPa), o kur moreninio grunto storumė homogeniškesnė ir vandeningų



4 pav. Tiriamojo moreninio grunto granulimetrinė sudėtis  
Fig. 4. Grain size composition of till soil



5 pav. Tiriamosios aikštelės vidutinis skersinės bangos greitis pagal gylį

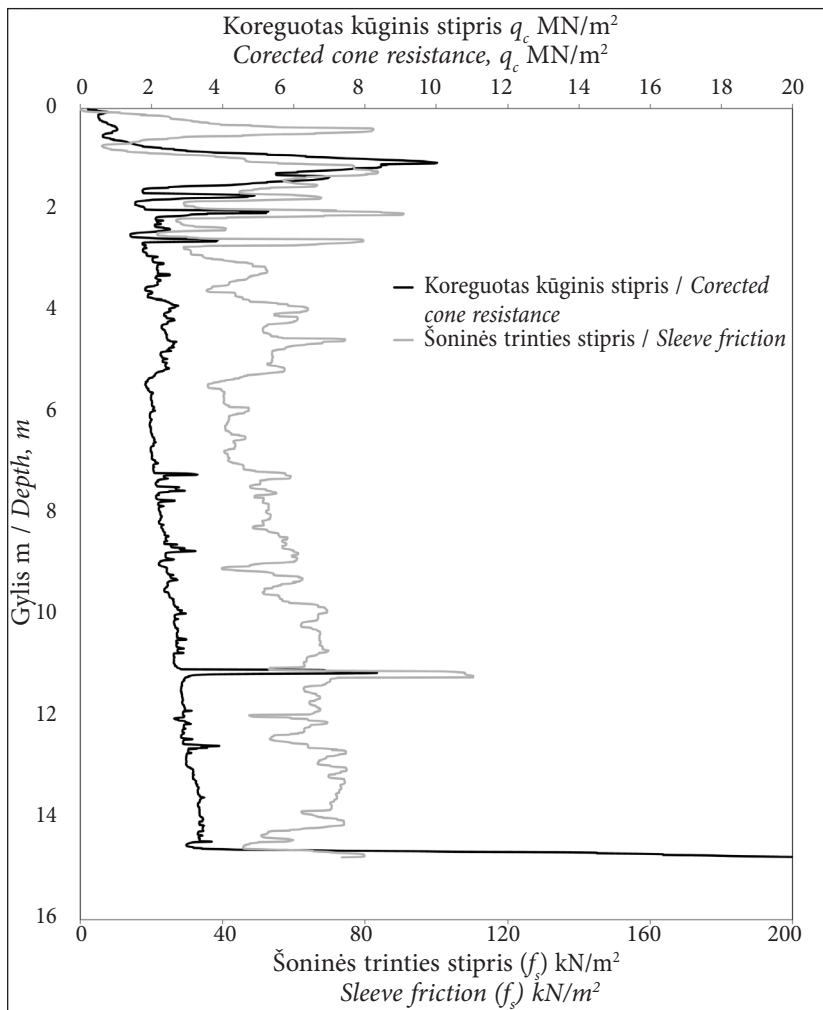
Fig. 5. Average shear wave velocity by depth at investigated site

smėlio lėšių nebuvo aptikta, ten porinis slėgis pakildavo iki 1 200 kPa. Įvertinus tai, kad vandeningi smėlio lėšiai dažnai iškraipydavo porinio slėgio matavimus, vidutinis porinis slėgis tose vietose priimamas 400 kPa. Statinio zondavimo metu fiksuotas kūginis stipris  $q_c$  įvertinant porinį slėgį ati-

tinkamai buvo perskaičiuotas į koreguotą kūginį stiprį  $q_t$  (6 pav.).

Siekiant kuo tiksliau atlikti modeliavimą visų pirma buvo atliktas gautų rezultatų tipizavimas:

1. Analizuojama tik moreninis gruntas, todėl visi smėlio, žvyro, limnoglacialinio molio ar dulquio lėšiai, mikrolėšiai buvo pašalinti iš duomenų imties.
2. Atliktas statinio zondavimo duomenų glodinimas.
3. Suklasifikuotas gruntas pagal normalizuotą grunto elgsenos tipo rodiklį  $I_c$  (Robertson, 2010):
  - a) molis –  $2,95 \leq I_c \leq 3,60$ ;
  - b) dulquio mišiniai –  $2,60 \leq I_c \leq 2,95$ ;
  - c) smėlio mišiniai –  $2,05 \leq I_c \leq 2,60$ ;
  - d) smėlis –  $1,31 \leq I_c \leq 2,05$ .
4. Suklasifikuotas gruntas pagal Lietuvoje naudojamą sąlyginį suskirstymą (vertinama pagal kūginį stiprį), kuris pateiktas 2015 m. parengtose projektyvių inžinerinių ir geologinių bei geotechninių tyrimų rekomendacijose. Ypač silpno ( $q_c < 0,5 \text{ MN/m}^2$ ) grunto tiriamame objekte neišskirta:



6 pav. Tiriamosios aikštelės tipinis zondavimo bandymo grafikas  
Fig. 6. Typical cone penetration test graph at investigation site

- a) silpnas –  $q_c < 1,50 \text{ MN/m}^2$ ;
- b) vidutinio stiprumo –  $q_c 1,51\text{--}2,50 \text{ MN/m}^2$ ;
- c) stiprus –  $q_c 2,51\text{--}4,00 \text{ MN/m}^2$ ;
- d) labai stiprus –  $q_c > 4,01 \text{ MN/m}^2$ .

Suformavus neuroninio tinklo modelį, buvo suprogramuotas MATLAB algoritmas. Nefiltruotas imties dydis – 5 740 taškų. Algoritme neuroninio tinklo struktūrai parinkti buvo naudotas DE evoliucinis algoritmas, o perdavimo funkcijos tiesinė ( $L$ ) ir sigmoidas ( $S$ )  $g(x) = 1/(1 + \exp(-x))$ . Visi įvedimo duomenys  $[x_1, x_2, \dots, x_6]$  yra atitinkamai koreguotas kūginis stipris ( $q_t$ ), šoninės trinties stipris ( $f_s$ ), trinties santykis ( $R_p$ ), vertikalus geostatinis slėgis ( $\sigma$ ), vertikalus efektyvus geostatinis slėgis ( $\sigma'$ ), poringumo koeficientas ( $e$ ), kurie yra normuojami intervale  $[0,1]$ , o išvedimo duomenys yra skersinės bangos greičiai ir normuojami intervale  $[-1,1]$ .

Mūsų atveju buvo naudojama ši tikslo funkcija:

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^L (\hat{a}_i g_i(w_i \cdot x_j + b_i) - t_i)^2 .$$

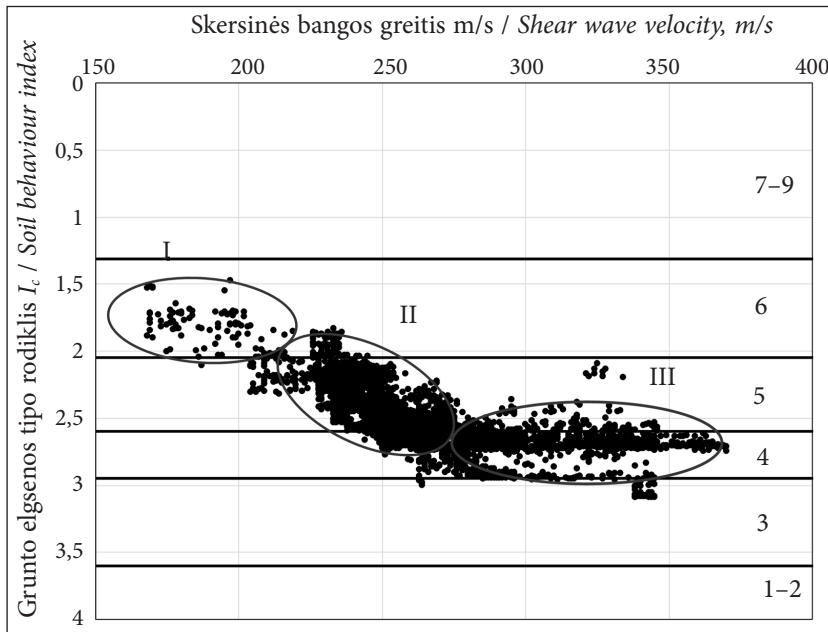
Verta pažymėti, kad modeliavimui itin svarbus reikiamas imties dydis, jis turi būti ne per mažas, kad išvengtume atsitiktinių reikšmių įtakos, kas šiuo atveju atsitiko su molio tipo gruntu, (tyrimo aikštelėje jo išskirta labai mažai ( $N < 40$ )), todėl toks modeliavimas su per maža imtimi laikomas nepatikimu.

Laboratorijoje išskirtas tiriamojo grunto pavadinimas – šiek tiek žvyringas smėlingas dulkingas molis, tačiau suradus grunto elgsenos tipo rodiklį ( $I_c$ ) nustatyta, kad nagrinėjamas gruntas yra 4 tipų, iš kurių smėlio ir dulkingo mišinių tipai yra vyraujantys. Į smėlio mišinių tipą paprastai patenka gruntai nuo dulkingų smėlių iki smėlingų dulkių, o į dulkingo mišinių – nuo molių iki dulkingų molių. Todėl Lietuvoje, kaip ir Europoje, naudojama klasifikacinė sistema ISO 14688-2 verčia abejoti jos patikimumu vertinant gruntą pagal jo elgseną, ypač tyrinėjant moreninius gruntus. Gruntų granuliometrinė sudėtis ir konsistencijos ribos įvertinamos dažniausiai iš suardytos sandaros mėginių, o atliekant statinį zondavimą kūgis reaguoja į *in-situ* mechaninę grunto elgseną, ne tiesiogiai į grunto sudėtį ar elastingumą. CPT metu išskirtas gruntas ne visada sutampa su tradiciniais metodais, kaip granuliometrinė analizė išskirtais grunto tipais, juo labiau kad Robertsono klasifikacija paremta USCS

(*Unified Soil Classification System*) klasifikacinė sistema, kuri skiriasi nuo Lietuvoje tradiciškai naudojamos ISO klasifikacinės sistemos (Robertson, 2012).

Inžinierius geologus labiau domina ne grunto tipas, paremtas tradiciniu klasifikavimo metodu pagal jo granuliometrinę sudėtį ir konsistencijos ribas, o *in-situ* grunto elgsena. Tradicinei Lietuvoje naudojamai EN ISO 14688-2 klasifikacinei sistemai sugretinti su statinio zondavimo rezultatais, o tiksliau – su grunto elgsenos tipu, ateityje reikalingi itin išsamūs ir didelės apimties tyrimai, nes remiantis gautais duomenimis matomi akivaizdūs nesutapimai tarp grunto granuliometrinės sudėties ir grunto elgsenos tipo rodiklio  $I_c$ .

Tyrimų aikštelėje vyraujantis gruntas pagal normalizuotą gruntų elgsenos rodiklį  $I_c$  dažniausiai yra priskiriamas smėlio ir dulkingo mišiniams, rečiau molio ar grynai smėliui. Kiekvienam grunto tipui pagal jo elgseną buvo priskirti skersinės bangos greičiai (7 pav.). Iš gautų duomenų matoma, kad tyrimų aikštelėje vyrauja smėlio ir dulkingo mišiniai, rečiau smėlio gruntai. Molio grunto šioje tyrimų aikštelėje aptikti tik pavieniai atvejai ( $n < 40$ ), kurie priskirti prie atsitiktinių reikšmių, nes modeliuojant šio grunto duomenis tikslo funkcija kito labai plačiai – nuo 3 iki 70, todėl šio tipo gruntas darbe nenagrinėtas. Taip pat pastebėta, kad tiriamasis moreninis gruntas, priklausomai nuo jo tipo, pagal elgsenos rodiklį pasižymėjo savitais skersinės bangos greičiais ir slūgsojimo gyliu. Smėlio gruntas išskirtas tik viršutinėje tyrimų dalyje iki 4 m gylio ir pasižymėjo mažiausiais skersinės bangos greičiais. Smėlio ir dulkingo mišinių pasiskirstymas pagal gylį buvo vienodesnis, skirtumas tik, kad didžiausias smėlio mišinių kiekis aptinkamas nuo 2,0 iki 8,0 m gylio, o dulkingo mišinių – nuo 8,0 iki 14,0 m gylio. Pagal  $I_c$  rodiklį akivaizdžiai išsiskiria trys nagrinėjamos skersinės bangos greičių zonos (7 pav.). I zona sutampa su smėlio tipo gruntais ir išsiskiria mažiausiomis skersinės bangos greičio vertėmis, kur  $V_s$  kinta nuo 175 iki 220 m/s. II zona apima ne tik smėlio mišinių tipą, tačiau didelį dalį ir dulkingo mišinių. III zona artima dulkingo mišiniams, tačiau labai maža riba tarp smėlio ir dulkingo mišinių. Didžiausios skersinės bangos vertės išskirtos dulkingo mišinių tipo gruntui. 7 pav. matoma, kad grunto elgsenos rodiklio tipo ribos, atsižvelgiant į skersinės bangos greičius, yra keistinos. Norint



7 pav. Skersinės bangos greitis skirtingam grunto elgsenos tipo rodikliui  $I_c$  (6 – smėlis, 5 – smėlio mišiniai, 4 – dulquio mišiniai, 3 – molis)

Fig. 7. Shear wave velocity for different soil behaviour type index  $I_c$  (6 – sand, 5 – sand mixtures, 4 – silt mixtures, 3 – clay)

patikslinti grunto elgsenos rodiklio ribas būtini papildomi tyrimai iš skirtingų tyrimų aikštelių nagrinėjant įvairios granulometrinės sudėties, skirtingų įtempių būklės moreninius gruntus.

1 lentelėje pateikiama atskiro nustatyto grunto tipo ( $I_c$ ) modeliavimo rezultatai. Moreninio grunto, kuris pagal elgsenos tipo rodiklį priskiriamas smėliui ir smėlio mišiniams, tikslo funkcija yra mažesnė ir siekia 10,2–10,6.

Dulquio mišinių tipui tikslo funkcija 1,7 karto didesnė, palyginti su smėlio ir smėlio mišinių tipu. Tai siejama su šoninės trinties stipriu ir skirtingo stiprumo gruntais, kurių pasiskirstymas tiek vertikaliame, tiek horizontaliame pjūvyje yra didelis. Smėlio mišinių skersinės bangos apmokymo ir treniravimo kreivės pateiktos 8 pav. Svarbu pažymėti, kad per didelė imtis gali turėti įtakos rezultatams dėl atsiradusio triukšmo, ir neuroninis tinklas gali apsimokyti.

Gavus atskiriems grunto tipams tikslo funkcijas, papildomai to tipo gruntas buvo suskirstytas pagal statinio zondavimo rezultatus, o tiksliau – pagal

kūginį stiprį ( $q_c$ ). Papildomas išskyrimas atliktas didžiausią paklaidą turėjusiam gruntui – dulquio mišiniams – siekiant gauti patikimesnius rezultatus. Atlikus modeliavimą dulquio mišiniams nustatytos akivaizdžiai mažesnės tikslo funkcijos (2 lentelė).

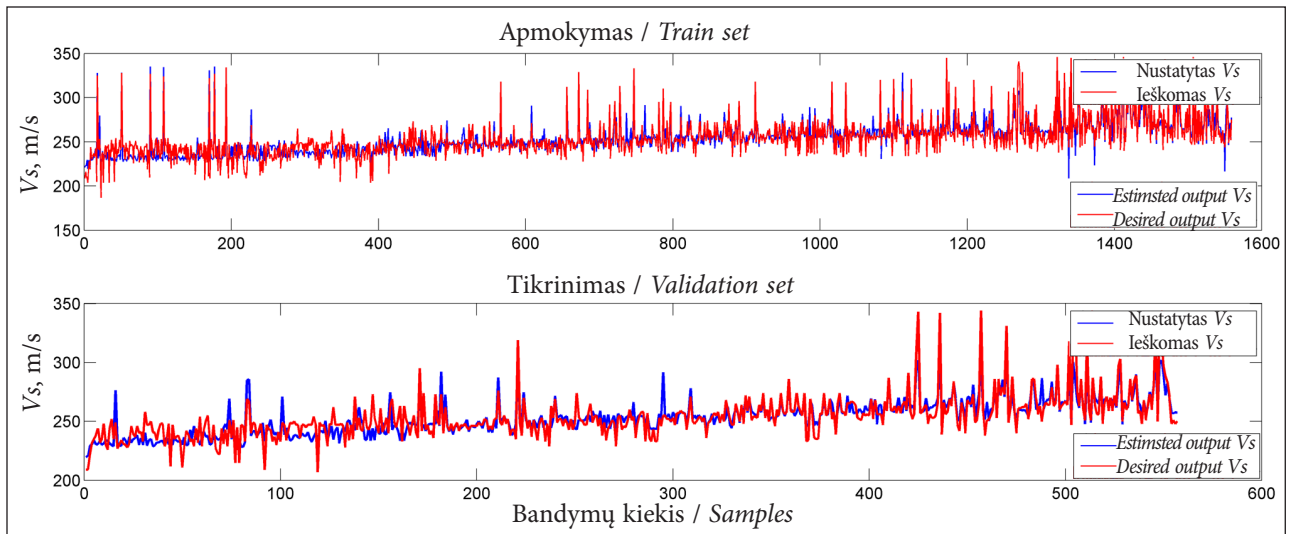
Suskirstę modeliuojamus dulquio mišinius pagal kūginį stiprį, gavome iki 3,0 kartų mažesnę tikslo funkciją, tai sudaro prielaidą atlikti papildomus grunto tipizavimus siekiant gauti kuo mažesnę tikslo funkciją. Pati mažiausia tikslo funkcija gauta silpnam dulquio mišiniui (5,7), nes kūginis stipris kinta itin mažame intervale, o vidutinio stiprumo ir stipriam gruntui tikslo funkcijos yra didesnės, tačiau, palyginti su netipizuotu gruntu pagal kūginį stiprį (1 lentelė), jos gautos mažesnės. Kuo detaliau tipizuojame savo tiriamąjį gruntą, tuo patikimesnius rezultatus gauname. Pakeitę tradicines Lietuvoje naudojamas klasifikavimo ribas pagal kūginį stiprį, pavyzdžiui, stipriam gruntui priskyre  $q_c$  vertes nuo 3,01 iki 4,00 MN/m<sup>2</sup> ir tada atlikę modeliavimą, gauname dar geresnius rezultatus – 12,8. Todėl

1 lentelė. Skirtingo grunto tipo modeliavimo rezultatai

Table 1. Results of modelling of different soil types

Grunto elgsenos rodiklis Soil behaviour type index, $I_c$	Įėjimų skaičius Input number	Paslėptų neuronų skaičius Number of hidden neurons	Perdavimo funkcija Activation function	Tikslo funkcija Objective function
Smėlis / Sand	6	5	SSSS	10,6
Smėlio mišiniai / Sand mixture	6	5	LSLLS	10,2
Dulquio mišiniai / Silt mixture	4	5	SSSLL	17,1





**8 pav.** Smėlio mišinių tipo VS bangų greičių analizė DE algoritmu

**Fig. 8.** Sand mixture type shear wave velocity analysis according to algorithm DE

taikydami neuroninius tinklus, panaudoję ekstremalųjį apmokymo algoritmą, modeliuodami nustatę tam tikras tikslo funkcijas galime patikrinti arba pasiūlyti pakeisti jau esamas gruntų klasifikavimo ribas konkrečiai pagal gaunamus modeliavimo rezultatus.

Iš gautų rezultatų matome, kad paslėptų neuronų skaičius visais atvejais – 5, o įėjimo skaičius kito nuo 4 iki 6. Didžiausias veiksnys pagal modeliavimo rezultatus, lemiantis skersinės bangos greitį, yra vertikalusis arba efektyvusis geostatinis slėgis. Kuo giliau, tuo grunto slėgimas iš viršaus didėja, todėl didėja ir vertikalūs įtempiai, kurie turi įtakos skersinės bangos greičiui. Šiek tiek mažesnė įtaka yra dėl grunto stiprumo ir fizinės būklės. Modeliuojant labai svarbu turėti tinkamą ir patikimą duomenų imtį, visų pirma ją apdoroti statistiškai, suklasifikuoti į tam tikrus parametrų ir lito-facijinius pogrupius ir tik tada atlikti patį modeliavimą. Gauti rezultatai visiškai leidžia panaudoti

sukurtą neuroninį tinklą skersinės bangos greičio paieškoms neatliekant pačio seisminio bandymo, o pasitelkus kitus įvesties rodiklius, naudotus šiame modeliavime.

## IŠVADOS

1. Glacialinių nuogulų granulimetrinės sudėties, poringumo koeficiento rodikliai ir statinio zonavimo metu gauti rezultatai parodė, kad gruntus prieš modeliavimą tikslinga suskirstyti į atskirus tipus.

2. Tyrimų aikštelės mažiausi skersinės bangos greičiai nustatyti smėlio tipo, o didžiausi – dulquio mišinių tipo gruntui. Tai siejama su gruntų fizine būkle.

3. Modeliuojant gauta, kad perdavimo funkcija vyravo tarp linijinės ir sigmoidinės, o aktyvavimo – visada linijinė. Įėjimų skaičius kito nuo 4 iki 6. Didžiausią įtaką skersinės bangos greičiui

2 lentelė. Dulquio mišinių tipo grunto modeliavimo rezultatai

Table 2. Results of modelling of silt mixture type soil

Stiprumas pagal $q_c$ Strength according to $q_c$	Įėjimų skaičius Input number	Paslėptų neuronų skaičius Number of hidden neurons	Perdavimo funkcija Activation function	Tikslo funkcija Objective function
Silpnas / Soft $q_c < 1,50$ MN/m <sup>2</sup>	3	5	LSLL	5,7
Vidutinio stiprumo / Firm $q_c 1,51-2,50$ MN/m <sup>2</sup>	4	5	LSLL	12,8
Stiprus / Stiff $q_c 2,51-4,00$ MN/m <sup>2</sup>	3	5	SLSSS	15,3
Stiprus / Stiff $q_c 3,01-4,00$ MN/m <sup>2</sup>	2	5	SLSS	12,7

turi vertikalūs arba efektyvusis geostatinis slėgis, mažesnę – fizinė būklė ir grunto stiprumas pagal kūginį stiprį.

4. Gauti dirbtiniai neuroniniai tinklai leidžia naudojant ekstremalaus neuroninio tinklo mokymo metodą pagal gautus charakteringus seisminių bangų pasiskirstymo tipus ir geotechninių rodiklių vertes sudaryti prognozinius seisminių bangų greičių analogus neatliekant seisminių bandymų.

Gauta 2016 04 13  
Priimta 2016 05 13

## Literatūra

- Gadeikis S., Klizas P., Mokrik R., Jokšas K. 2012. *Geoinžineriniai lauko tyrimų metodai*: mokomoji knyga. (CD). Vilnius: Vilniaus universitetas. 237 p.
- Gadeikis S., Dundulis K., Žaržojus G., Gadeikytė S., Urbaitis D., Gribulis D., Šliaupa S., Gabrielaitis L. 2013. Correlation between shear wave velocity and cone resistance of Quaternary glacial clayey soils defined by Seismic Cone Penetration Test (SCPT), Lithuania. *Journal of Vibroengineering*. 15(2): 992–998.
- Ferrari S., Stengel R. F. 2005. Smooth function approximation using neural networks. *IEEE Trans. Neural Networks*. 16(1): 24–38.
- Hardin B. O. 1978. The nature of stress strain behavior of soils. *Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. ASCE. 1: 3–90.
- Huang G. B. 1998. *Learning Capability of Neural Networks*, Ph. D. Thesis, Nanyang Technological University, Singapore.
- Huang G. B., Babri H. A. 1998. Upper bounds on the number of hidden neurons in feedforward networks with arbitrary bounded nonlinear activation functions. *IEEE Trans. Neural Networks*. 9(1): 224–229.
- Huang G. B. 2003. Learning capability and storage capacity of two-hidden-layer feedforward networks *IEEE Trans. Neural Networks*. 14(2): 274–281.
- Wair B. R., DeJong J. T., Shantz T. 2012. *Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity Profiles*. PEER Report No. 2012/08. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Yu P., Richart F. E. 1984. Stress ratio effects on shear modulus of dry sands. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. 110(3): 331–345.
- Youd T. L., Idriss I. M. 2001. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering*. ASCE. 127(10): 297–313.
- Luna R., Jado H. 2000. Determination of dynamic soil properties using geophysical methods. *Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure – Geophysics 2000*. Federal Highway Administration, Saint Louis, MO. Paper 3–1. 15 p.
- Marchetti S., Monaco P., Totani G., Marchetti D. 2008. In situ tests by seismic dilatometer (SDMT). In: M. H. Hussein, J. E. Laier, D. K. Crapps (eds.). *From Research to Practice in Geotechnical Engineering*. ASCE. 292–312.
- Robertson K. P. 2010. Soil behavior type from the CPT: an update. *The 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing – CPT'10*. Anonymous Huntington Beach, California. 2: 1–8.
- Robertson K. P. 2012. The James K. Mitchell Lecture: Interpretation of in-situ tests – some insights. *Proceedings of ISC-4 International Conference on Site Characterization*. Porto de Galinhas – Brazil. 3–24.
- Roesler S. K. 1979. Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*. 105(7): 871–880.
- Stokoe K. H., II, Lee S. H. H., Knox D. P. 1985. Shear modulus measurement under true triaxial stresses. *Proceedings of the Geotechnical Engineering Division: Advances in the Art of Testing Soil Under Cyclic Conditions*. ASCE. Detroit, MI. 166–185.
- Woods R. D., Henke R. 1981. Seismic techniques in the laboratory. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. ASCE. 107(GT10): 1309–1325.
- Woods R. D. 1994. Borehole methods in shallow seismic exploration. In: R. Woods (ed.). *Geophysical Characterization of Sites*. ISSMGE Technical Committee 10. New Delhi. 91–100.

**Donatas Urbaitis, Audrius Indriulionis,  
Robert Mokrik, Juozas Kastytis Dundulis**

**SEISMIC SHEAR WAVE VELOCITY IN SOIL  
MODELLING BY USING EXTREME LEARNING  
MACHINES**

*Summary*

Artificial neural networks are more and more often applied not only in diagnostics, finance, regulation and computer graphics, but also in engineering geology. In our work, artificial neural networks were used for studying strength characteristics indexes in Lithuanian soils for the first time. Investigation involved analysis of till clayey soil from Stabatiškės area. In the study area, the cone penetration test was carried out for determination of conditional strength of soil, and the seismic cone penetration test was carried out to es-

timate shear wave velocity ( $V_s$ ). The extreme learning machine (ELM) was used in artificial neural training mode, and stochastic search models were used in data optimization, which discovered the values of global maximum and minimum. Differential evolution (DE) algorithm was used in this modelling (simulation). The selected input parameters in the model were: corrected cone resistance ( $q_c$ ), sleeve friction ( $f_s$ ), friction ratio ( $R_f$ ), vertical geostatic stress ( $\sigma$ ), vertical effective stress ( $\sigma'$ ), and void ratio ( $e$ ). Shear wave velocity ( $V_s$ ) was an output parameter. After modelling, prediction analogues of shear wave velocities were made, which allowed estimating dynamic soil properties without seismic testing.

**Key words:** extreme learning machine (ELM), shear wave velocity, neuron network, till soil, cone resistance ( $q_c$ )