

Primljen / Received: 19.9.2021.

Ispravljen / Corrected: 13.4.2022.

Prihvaćen / Accepted: 30.6.2022.

Dostupno online / Available online: 10.10.2022.

Statističko istraživanje recikliranja plastičnog otpada ponovnom uporabom u tlu

Autori:



Masoomeh Khodabakhshi, dipl.ing.građ.

Sveučilište Guilan, Iran

Tehnički fakultet

Odjel za građevinarstvo

m.khodabakhshi.s@gmail.com



Prof.dr.sc. **Mahyar Arabani**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Guilan, Iran

Tehnički fakultet

Odjel za građevinarstvo

arabani@guilan.ac.ir

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Masoomeh Khodabakhshi, Mahyar Arabani

Statističko istraživanje recikliranja plastičnog otpada ponovnom uporabom u tlu

Recikliranje i ponovna uporaba plastičnog otpada ključna je za ublažavanje njegovog negativnog utjecaja na okoliš i gospodarstvo. Ovaj rad predlaže evolucijsku polinomnu regresiju (eng. *Evolutionary Polynomial Regression - EPR*) kao snažnu metodu za predviđanje stišljivosti pijeska pomiješanog s polietilenom visoke gustoće (HDPE). U svrhu istraživanja proveden je niz opsežnih pokusa pomoću velikog edometra. Za izradu EPR modela korišteni su rezultati koeficijenta bočnog pritiska tla i modula promjene volumena mješavina. Kako bi se ocijenili parametri modela, provedene su analize osjetljivosti. Rezultati su pokazali da je EPR model učinkovit za procjenu karakteristika mješavine.

Ključne riječi:

plastični otpad, polietilen visoke gustoće, veliki edometar, EPR, geotehnika i zaštita okoliša

Research Paper

Masoomeh Khodabakhshi, Mahyar Arabani

Statistical investigation on plastic waste recycling by reusing in soil

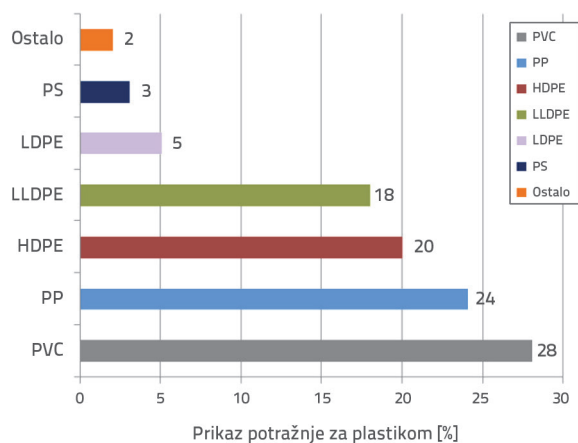
Recycling and reusing plastic waste are key options for ameliorating its negative effects on the environment and the economy. This paper proposes evolutionary polynomial regression (EPR) as a powerful technique to predict the compressibility behavior of sand and high-density polyethylene (HDPE) mixtures. In the investigation, a series of large-scale oedometer experiments were conducted. The results of the coefficients of lateral earth pressure and volume compressibility coefficients of different mixtures were used to develop EPR models. The model parameters were evaluated by sensitivity analyses. The results showed that the best developed EPR model is robust for estimating the characteristics of sand and HDPE mixtures.

Key words:

plastic waste, high-density polyethylene, large-scale oedometer test, EPR, environmental geotechnics

1. Uvod

Uzrok globalnog zatopljenja su staklenički plinovi, kao što je primjerice metan, koji se emitiraju korištenjem fosilnih goriva. Ackerman [1] je pokazao da se većina ili sav organski otpad na odlagalištima otpada raspada anaerobno, a većina ugljika postupno se otpušta u atmosferu, otprilike polovica kao ugljikov dioksid, a polovica kao metan. Problem je u metanu: ista količina ugljika ima 21 puta veći potencijal za pogoršanje globalnog zatopljenja ako se oslobađa kao metan, a ne kao ugljikov dioksid. Nepravilan postupak s otpadom na nekontroliranim odlagalištima s neadekvatnom ugradnjom i zbijanje postaje potencijalno ozbiljan problem povezan sa sanitarnim uvjetima, javnim zdravljem i estetikom. Međutim, raspadanje otpada pod tim je uvjetima aerobno, te se sav ugljik oslobađa kao ugljični dioksid, a ne metan. Plastični otpad koji se stvara svakodnevno emitira znatne količine ugljičnog dioksida kao stakleničkog plina. Istraživanje Agencije za zaštitu okoliša SAD-a (EPA) pokazalo je da se najmanje 114 milijuna tona ekvivalenta ugljičnog dioksida (CO₂e) godišnje emitira iz 130 postrojenja za proizvodnju plastike i srodnih elektrana, što je jednako 57 "prosječnih" elektrana na ugljen [2]. Stoga su recikliranje/oporaba/rukovanje plastikom, kao značajnim udjelom komunalnog krutog otpada, glavne metode za ublažavanje ekoloških problema i ponovnu upotrebu sirovina. Ovisno o početnoj uporabi, vrste plastičnog otpada uključuju polietilen tereftalat (PET), polietilen visoke gustoće (HDPE), polietilen niske gustoće (LDPE), polipropilen (PP) i polistiren (PS). Slika 1. prikazuje stupčasti grafikon klasifikacije vrsta plastike prema potražnji [3]. Vodoravna os prikazuje potražnju za plastikom u postocima, a okomita os predstavlja vrste plastike. Druge vrste plastike kao što je PET uključene su u traku pod nazivom "OSTALO" na okomitoj osi. Ovaj stupčasti grafikon pokazuje da PP, PVC i HDPE čine najveći udio u vrstama najčešće korištene plastike.



Slika 1. Klasifikacija vrsta plastike prema potražnji [3]

Različiti istraživači proučavali su upotrebu plastike za poboljšanje tla, a ovdje se navode neka od njihovih istraživanja.

Choudhary i sur. [4] primijenili su HDPE trake za ojačanje lokalnog pijeska i proveli niz laboratorijskih CBR pokusa na neojačanim i na ojačanim uzorcima pijeska s nasumično orijentiranim HDPE trakama. Zabilježena su značajna povećanja karakteristika elastičnosti i otpornosti na deformacije. Predložili su korištenje tla ojačanog trakom od otpadne plastike kako bi se smanjili troškovi stabilizacije podloge (temelnog tla) i promicalo sigurno odlaganje tih otpadnih materijala na ekološki prihvatljiv način. Kalumba [5] je upotrijebio otpad iz HDPE vrećica za kupnju kako bi ojačao dva odabrana pjeskovita tla (Klipheuwel i Cape Flat pijesak). Ovim istraživanjem ispitivale su se trake usitnjenog plastičnog materijala različitih promjera i omjera širine kao ojačanje pjeskovitih tala. Laboratorijski rezultati pokazali su da dodavanje HDPE traka utječe na parametre posmične čvrstoće mješavine.

Kumar i sur. [6] proučavali su ojačavajuće učinke traka od plastičnog otpada na tlo nizom standardnih Proctorovih postupaka i nepotopljenih CBR (kalifornijski indeks nosivosti) pokusa. Korišteni su prah niske plastičnosti (ML) prema indijskom standardnom sustavu klasifikacije tla (ISSCS) i niske stišljivosti, i LDPE. Zaključili su da se tlo sa 6 % plastičnog otpada može učinkovito upotrebljavati za njegovu stabilizaciju na ekološki prihvatljiv i ekonomičan način.

Rakic i sur. [7] klasificirali su komunalni otpad prema njegovom dominantnom učinku i svojstvima, oslanjajući se na različite postojeće sustave klasifikacije. Na temelju kumulativnih krivulja distribucije veličine čestica različitog komunalnog otpada s odlagališta Ada Huja pokazalo se da plastika ima najveći težinski postotak u odnosu na ukupnu masu na odlagalištu.

Abukhettala i sur. [8] istražili su neka od geotehničkih svojstava upotrebe plastičnog otpadnog materijala u cestovnoj podlozi. Rezultati su pokazali poboljšanja čvrstoće, smanjenje debljine i smanjenje troškova konstrukcije ceste ili kolnika. Predložili su da bi se djelomična zamjena mogla pokazati korisnom u primjeni na cestovnim podlogama.

Aswad Hassan i sur. [9] ispitivali su inženjerska svojstva tla pomiješanog s dva otpadna materijala u obliku vlakana (polietilen i polipropilen). Stabilizacija tla tim vlaknima mogla bi učinkovito poboljšati svojstva čvrstoće materijala tla za građevinske projekte. Duljina i količina vlakana utječe na svojstva čvrstoće stabiliziranog tla.

Do sada nije bilo dovoljno istraživanja o ponašanju mješavina komadića polietilena visoke gustoće (HDPE) i pijeska, a posebno onih u kojima se koriste veliki edometri. Cilj je ovog istraživanja procijeniti karakteristike deformacije mješavine pijeska s komadićima HDPE-a i bez njih razvojem modela evolucijske polinomne regresije (EPR), koji pridonosi poboljšanju tla i smanjenju onečišćenja okoliša.

2. Izrada EPR modela

Postoje dvije dobro poznate vrste modeliranja i računalne inteligencije temeljene na podacima, točnije, genetsko programiranje (GP) i umjetne neuronske mreže (ANN). ANN

su alternativa predložena kao alat za modeliranje inspiriran strukturom ljudskog mozga. Oni uče iz iskustva i generaliziraju otkrivajući obrasce i odnose u podacima.

GP je pristup evolucijskom algoritmu koji koristi populaciju neprikladnih programa, funkciju prikladnosti i višestruke evoluirane generacije. Unatoč svojim pozitivnim stranama, GP ima tendenciju proizvesti funkcije koje tijekom vremena rastu i nije uspješan u pronalaženju konstante.

Giustolisi i Savić [10, 11] primijenili su EPR u hidroinformatičkim i ekološkim problemima. To je evolucijska računaska metoda koja radi s golemom količinom podataka kako bi razjasnila složene i nelinearne odnose među varijablama sustava. EPR je tehnika dvije faze; u prvoj fazi (identifikacija strukture), GA traži strukture, a u drugoj fazi (procjena parametara) konstantne vrijednosti se procjenjuju rješavanjem linearnog problema najmanjih kvadrata (LS). Program se sastoji od 56 jedinstvenih pravila i algebarski transformira ove modele putem GP evolucijskog procesa na desnu stranu izraza (1):

$$y = \sum_{j=1}^m a_j z_j + a_0 \quad (1)$$

u kojoj y označava LS procjenu ciljne vrijednosti, a_j predstavlja podesivi parametar za j^{th} izraz, a_0 je izborna pristranost, m pokazuje broj izraza ili parametara izraza, z_j označava transformiranu varijablu koja je funkcija nezavisnih varijabli, unosi (x_1, x_2, \dots, x_k) se ocjenjuju na j^{th} podatkovnoj točki, a k je broj ulaznih varijabli.

Za razvoj EPR modela, izraz (1) treba najprije pretvoriti u izraz (2):

$$y_{N \times 1}(\theta, Z) = [I_{N \times 1} \quad Z_{N \times M}^j] \times [a_0 \quad a_1 \quad \dots \quad a_m]^T = Z_{N \times d} \times \theta_{d \times 1}^T \quad (2)$$

u kojem $y_{N \times 1}(\theta, Z)$ predstavlja LS vektor procjene N ciljnih vrijednosti, $\theta_{d \times 1}$ prikazuje vektor $d = m + 1$ parametara a_j , $j = 1, m$, $Z_{N \times d}$ označava matricu formiranu putem I , za pristranost a_0 , i m je vektor varijabli z_j koje su za fiksni "j" umnošci nezavisnih prediktor vektora varijabli ili unosa, $X = (X_1, X_2, \dots, X_k)$.

U ovoj se metodi globalni algoritam pretraživanja pokreće za kompozicije ulaznih varijabli i eksponente unosa istovremeno na temelju korisnički definirane troškovne funkcije. Matrica unosa X dana je kao izraz (3):

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M1} & \dots & x_{Mk} \end{bmatrix} = [X_1 \quad X_2 \quad \dots \quad X_k] \quad (3)$$

u kojoj k^{th} stupac X prikazuje kandidatske varijable za j^{th} izraz (2). Dakle, izraz j^{th} u (2) može se napisati na sljedeći način:

$$Z_{N \times 1}^j = [(X_1)^{ES(j,1)} \cdot (X_2)^{ES(j,2)} \dots (X_k)^{ES(j,k)}] \rightarrow j = 1, \dots, d \quad (4)$$

gdje z^j je j^{th} vektor stupca čiji su elementi umnošci ulaznih kandidatskih unosa, a ES označava matricu eksponenta. Problem je pronaći matricu $ES_{m \times k}$ eksponenta čiji elementi mogu imati vrijednosti unutar korisnički definiranih granica. Na primjer, ako su kandidatski eksponenti za stupce u X odabrani kao $EX = [0, 1, 2]$, broj izraza (m) se uzima kao 4, a broj kandidatskih varijabli (k) je 3, tada je problem polinomne regresije pronaći matricu eksponenta $ES_{4 \times 3}$. Primjer takve matrice prikazan je u nastavku:

$$ES_{4 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Primjenom ove matrice na izraz (4), dobiva se sljedeći skup matematičkih izraza (6):

$$Z_1 = (X_1)^1 \cdot (X_2)^0 \cdot (X_3)^0 = X_1$$

$$Z_2 = (X_1)^1 \cdot (X_2)^1 \cdot (X_3)^0 = X_1 \cdot X_2 \quad (6)$$

$$Z_3 = (X_1)^{-1} \cdot (X_2)^0 \cdot (X_3)^1 = X_1^{-1} \cdot X_3$$

$$Z_4 = (X_1)^0 \cdot (X_2)^1 \cdot (X_3)^{-1} = X_2 \cdot X_3^{-1}$$

Prema tome, na temelju glavne R-RGP matrice, izraz (2), dobiva se izraz (7):

$$Y = a_0 + a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + a_3 Z_3 + a_4 Z_4 \quad (7)$$

$$= a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_1 X_2 + a_3 X_3 / X_1 + a_4 X_2 / X_3$$

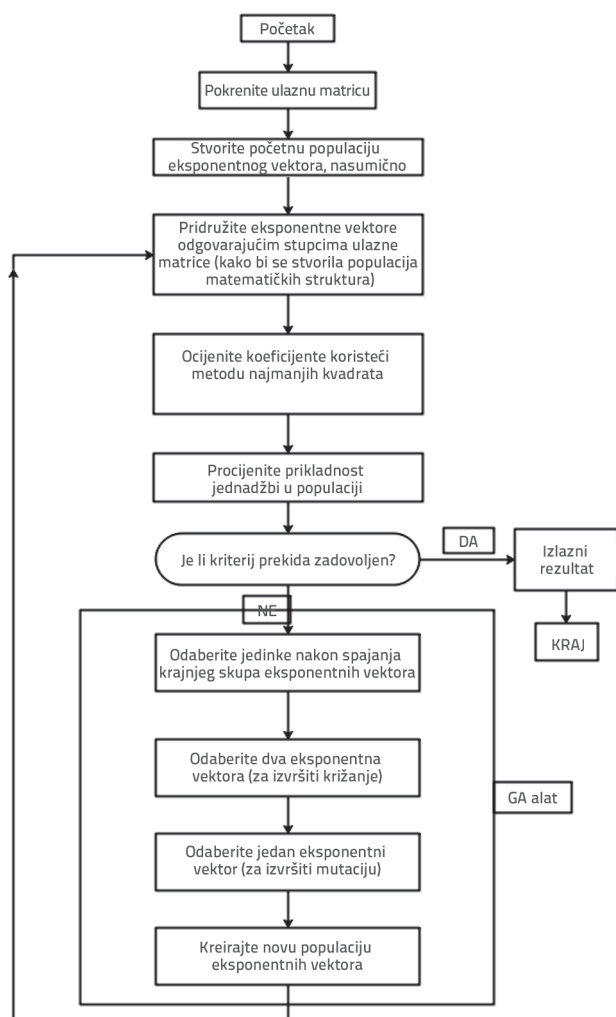
EPR izračunava podesive parametre a_j putem linearne LS metode minimiziranjem zbroja kvadratnih pogrešaka (SSE) kao troškovne funkcije. Svaki eksponent u matrici ES odgovara vrijednosti u korisnički definiranom EX . Prema tome, problem simboličke regresije pretvara se u problem pronalaženja najboljeg ES -a, odnosno pronalaženja EPR strukture preko GA cijelog broja.

Kao glavni rezultat regresijske analize, COD označava udio odstupanja u ovisnoj varijabli koji se može predvidjeti iz neovisne varijable. COD je korišten za procjenu izvedbe modela predviđanja. Funkcija SSE također se koristi za usmjeravanje procesa traženja prema modelu koji najbolje odgovara, a COD je usvojen za mjerenje točnosti predloženih modela, tj. funkcije prikladnosti, kako slijedi:

$$COD = 1 - \frac{\sum_N (Y_a - Y_p)^2}{\sum_N (Y_a - \frac{1}{N} \sum_N Y_a)^2} \quad (8)$$

$$SSE = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_a - Y_p)^2}{N}$$

Slika 2. prikazuje tipični shematski prikaz EPR postupka. Ovisno o prijenosnoj funkciji koju je korisnik odabrao za skrivene neurone, ANN-ovi su linearni ili nelinearni, dok EPR svladava ovaj problem i može izvesti i linearne i nelinearne analize u jednom algoritmu [11]. Procjena parametara i prekomjerno prilagođavanje nedostaci su modela izrađenih pomoću ANN-a. EPR bi mogao prevladati nedostatke u GP procesu, kao što je broj evolucijskih parametara za podešavanje, računalna izvedba i složenost simboličkih modela [11]. U ovom istraživanju EPR je odabran kako bi se izbjegli problemi povezani s ANN-om i GP-om. U tu svrhu dodatno je istražena primjena ove metode u modeliranju inženjerskih problema.



Slika 2. Dijagram toka za EPR postupak [12]

3. Primjena EPR-a u izradi modela inženjerskih problema

Brojna su se istraživanja bavila potencijalom EPR-a u modeliranju i analizi različitih disciplina inženjerstva od konstrukcijskog do geotehničkog inženjerstva i inženjerstva

zaštite okoliša. Ghaboussi i sur. [13] prvi su predložili primjenu ANN-a u modeliranju materijala za izradu modela ponašanja betona. Od tada su istraživači pokušali odrediti primjenu na druge inženjerske materijale, uključujući tlo i otpadne materijale.

Bruno i sur. [14] prvi su put upotrijebili EPR model za procjenu kratkoročne dinamike obale koja se nalazi na jonskoj obali regije Apulija. Njihovi su rezultati pokazali da se EPR može koristiti za pouzdano predviđanje razvoja obale.

Ahangar-Asr i sur. [15] prikazali su primjenu EPR-a za analizu stabilnosti tla i stijenskih kosina. Primijenili su EPR model za predviđanje faktora sigurnosti kosina na slom za uvjete koji se ne koriste u procesu izrade modela. Rezultati su pokazali da su predloženi modeli vrlo učinkoviti i robusni u točnom predviđanju različitih aspekata ponašanja kosina.

Rezania i sur. [12] upotrijebili su EPR za procjenu potencijala likvefakcije tla i bočnog pomaka uzrokovanih potresom. Zaključeno je da razvijeni modeli uče složeni odnos između bilo kojeg od ovih problema i odlučujućih čimbenika u obliku funkcije s visokom točnošću (uglavnom većom od 90 %).

Faramarzi i sur. [16] razvili su EPR za predviđanje ponašanja čeličnih ploča posmičnih zidova (SPSW) pod cikličkim djelovanjem. Rezultati su pokazali da predloženi pristup može predvidjeti bočnu deformaciju SPSW-a uslijed cikličnog opterećenja.

Ahangar-Asr i sur. [17] predložili su novi pristup za procjenu propusnosti tla (K), maksimalne suhe gustoće (MDD) i optimalnog udjela vlage (OMC) tla, kao funkcijama fizikalnih svojstava tla, primjenom EPR metode. EPR modeli razvijeni su na temelju rezultata eksperimentalnih ispitivanja, uključujući standardne Proctorove pokuse te pokuse određivanja propusnosti s konstantnim i s promjenjivim potencijalom, provedenih na tlu koje se sastoji od četiri komponente (bentonit, vapnenačka prašina, pijesak i šljunak) pomiješane u različitim omjerima. Usporedba rezultata pokazala je da su razvijeni EPR modeli vrlo precizni i robusni u predviđanju propusnosti tla i svojstava zbijenosti.

Ahangar-Asr i sur. [18] predložili su korištenje EPR-a za predviđanje karakteristične krivulje tlo-voda (SWCC). Model razvijen od strane EPR-a potvrđen je korištenjem baze podataka iz ispitivanja tlačne ploče izvedenih na glini, prašinstoj glini, pjeskovitoj ilovači i ilovači. Rezultati predviđanja iz modela uspoređeni su sa stvarnim podacima. Također je provedena parametarska analiza kako bi se procijenio učinak odlučujućih parametara na predviđanja predloženog EPR modela. Zaključeno je da razvijeni EPR model daje vrlo precizna predviđanja za SWCC.

Keramati i sur. [19] uveli su primarni model temeljen na EPR-u za predviđanje naponsko-deformacijskog ponašanja krutog otpada na odlagalištu Kahrizak (Iran) pod različitim početnim uvjetima, analizom rezultata pokusa velikog smicanja. Rezultati su pokazali da predloženi EPR modeli imaju značajan potencijal za procjenu naponsko-deformacijskog ponašanja otpadnih materijala.

Salehi Khoshkroudi i sur. [20] razvili su EPR model za predviđanje količine vode saturiranog tla (SWC) i potvrdili ga koristeći tri baze podataka. Za procjenu pouzdanosti pedotransferne funkcije (PTF-ova) usvojena je *jackknife* metoda unakrsne validacije. Među svim PTF-ovima koje je pružio EPR odabran je onaj s najvećim koeficijentom determinacije (COD) i najmanjim brojem izraza. Njihovi su rezultati jasno pokazali pouzdanost predloženog EPR pristupa u predviđanju SWC-a.

Karimnader-Shalkouhi i sur. [21] predstavili su novi pristup, temeljen na EPR-u, za predviđanje faktora sigurnosti obalnog zida na klizanje, prevrtanje i slom tla, kao funkcija parametara posmične čvrstoće tla, geometrije zida i uvjeta opterećenja. Geotehnička svojstva tla, geometrijski parametri zida i uvjeti opterećenja korišteni su za procjenu faktora sigurnosti obalnog zida u dreniranim i nedreniranim uvjetima. Usporedili su EPR modele s vrijednostima u bazi podataka. Usporedba rezultata pokazala je da razvijeni modeli daju vrlo precizna predviđanja od ~95 %.

4. Laboratorijsko ispitivanje za razvoj modela temeljenog na EPR-u

4.1. Materijal

Materijal koji je upotrijebljen za ispitivanje u velikom edometru, za potrebe razvoja EPR modela, uključivao je pijesak iz lagune Anzali i HDPE. Prema Jedinstvenoj klasifikaciji tla (USCS), pijesak iz lagune Anzali (Iran) loše je graduirani pijesak (SP) [22]. Prethodna istraživanja odredila su raspon fizikalnih karakteristika pješčanog tla lagune Anzali [22] (prva dva stupca tablice 1.). Izmjerene vrijednosti parametara tla korištenih u ovom istraživanju dane su u zadnjem stupcu tablice 1. Tablice 2. do 4. navode gradaciju pijeska, svojstva HDPE komadića i gradaciju HDPE-a. HDPE komadići koji su korišteni u ovom istraživanju kupljeni su u usitnjenom obliku iz tvornice za recikliranje. U tvornici se HDPE, nakon pranja i sušenja, usitnjava u male komadiće pomoću strojnih rezača.

Tablica 1. Fizikalni parametri za pijesak iz lagune Anzali

Parametar	Minimum	Maksimum	Izmjereno
D ₅₀ [mm]	0,21	0,32	0,21
D _{max} [mm]	1,18	2,36	1,18
C _u	1,9	2,5	2,4
C _c	0,83	1,2	1,20
γ _{dmax} [kN/m ³]	15,1	16,9	16,2
γ _{dmin} [kN/m ³]	14	15,8	15
e _{min}	0,57	0,69	0,605
e _{max}	0,69	0,89	0,73
G _s	2,59	2,70	2,65

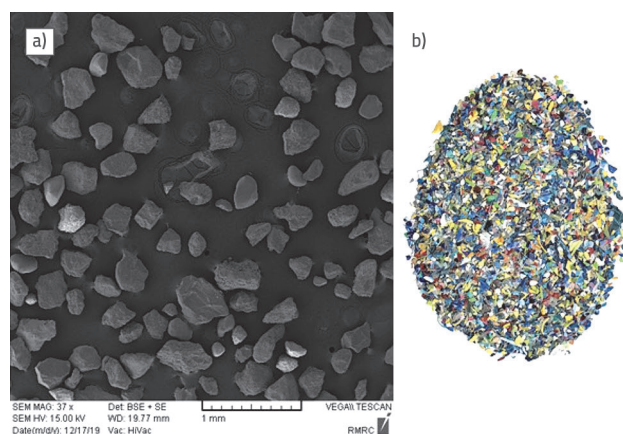
Tablica 2. Raspodjela veličine čestica pijeska

Broj sita	Masa koja prolazi [%]
Br. 4 (4,75 mm)	99,98
Br. 8 (2,36 mm)	99,76
Br. 16 (1,18 mm)	99,70
Br. 30 (0,595 mm)	99,50
Br. 50 (0,3 mm)	94,64
Br. 100 (0,15 mm)	6,76
Br. 200 (0,075 mm)	0
Posuda	0

Tablica 3. Svojstva HDPE smole za geomembrane u geotehničkom inženjerstvu

Karakteristika	Svojstvo
Komonomer	Buten ⁻¹ , heksan ⁻¹ , okten ⁻¹
Frakcija komonomera	< 10 % prema težini
Gustoća	0,932-0,942 g/cm ³
Stopa masenog protoka taline (190/5)	0,3-3 g/10 min
Temperatura taljenja	130°
Kristalnost	50-55 %
Prosječna molekulska masa, Mn	15000-50000
Polidisperznost, Mw/Mn	4-15

Slika 3. prikazuje fotografije pijeska iz lagune Anzali dobivene pomoću optičkog mikroskopa i uvećane fotografije usitnjenog HDPE-a.



Slika 3. a) Fotografije Anzali pijeska dobivene pomoću optičkog mikroskopa; b) uvećane fotografije usitnjenog HDPE-a

Tablica 4. Raspodjela veličine čestica HDPE-a

Broj sita	Masa koja prolazi [%]
Br. 4 (4,75 mm)	100
Br. 8 (2,36 mm)	99,99
Br. 16 (1,18 mm)	42,18
Br. 30 (0,595 mm)	11,67
Br. 50 (0,3 mm)	2,073
Br. 100 (0,15 mm)	0,316
Br. 200 (0,075 mm)	0
Posuda	0

4.2. Ispitivanje u velikom edometru

Veliki edometri zasigurno mogu prevladati dva glavna problema edometra standardne veličine (tipa Casagrande):

- ograničenje najvećeg promjera čestica uzorka
- ograničenje veličine primijenjenog vertikalnog naprezanja.

Štoviše, veći bi uzorak vjerojatno bio reprezentativniji uvjetima na terenu. Budući da se opterećenje primjenjuje hidraulički, brzina nametanja opterećenja može biti pažljivo kontrolirana kako bi odgovarala svrsi mjerenja [23].



Slika 4. Veliki edometarski uređaj

Za mjerenje stišljivosti pijeska s HDPE komadićima pod okomito primijenjenim naprezanjem, korišten je veliki cilindrični edometar promjera 492 mm i visine 550 mm koji je projektiran, proizveden i kalibriran u Laboratoriju za mehaniku tla Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Guilanu (slika 4.). Edometar se sastojao od teretnog okvira, računalno upravljano hidrauličnog klipa za punjenje, edometarske čelije, radne zapremnine, pornog tlaka, pretvarača normalnog i bočnog tlaka i računalnog sustava za prikupljanje podataka [24].

Za provođenje ispitivanja pet je omjera suhe mase HDPE-a, uključujući 0, 2, 4, 6 i 8 % na volumetrijskoj osnovi odabrano i ručno su pomiješani s tlom. Da bi se izbjeglo odvajanje tijekom pripreme uzorka, malo je vode dodano u suho tlo kako bi se ono djelomično namočilo, a komadići HDPE-a ravnomjerno su raspoređeni s tlom. Nakon miješanja, uzorci su ugrađeni u pet slojeva; svaki sloj je ukalupljen u komoru velikog edometra; a korištena je ručna zbijalica za zbijanje slojeva i postizanje ciljane suhe gustoće. Vrijednosti od 40 % i 70 % za relativne gustoće smjese odabrane su za istraživanje karakteristika deformabilnosti tla i HDPE-a. Opterećenje je primijenjeno uzastopno u koracima od 100, 200 i 300 kPa. Zbog kombinacije tla s pet omjera suhe mase HDPE-a, pri dvije relativne gustoće i pod tri opterećenja (5 x 2 x 3), provedeno je 30 serija ispitivanja u velikom edometru. Vertikalni pomak i bočno opterećenje dobiveni su iz ispitivanja velikog edometra na temelju primijenjenog opterećenja.

Izraz (9) prikazuje koeficijent bočnog pritiska tla K_0 koji se definira kao omjer horizontalnog opterećenja σ_h i vertikalnog opterećenja σ_v , a koji se dobivaju iz rezultata ispitivanja.

$$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (9)$$

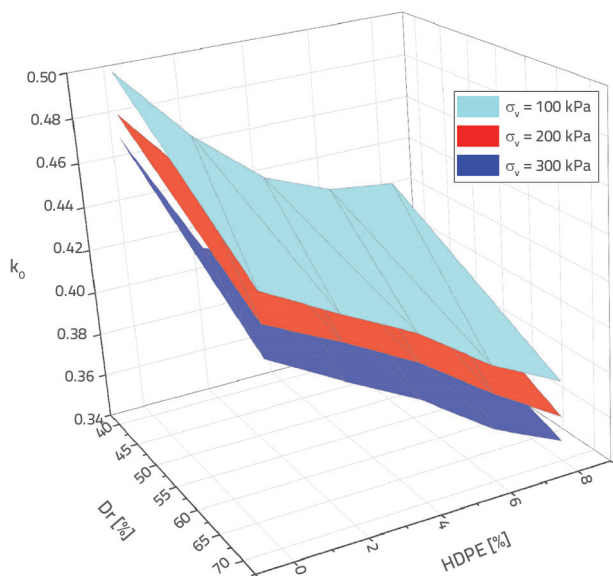
5. EPR izrada modela

Tri ulazne varijable, tj. količina HDPE-a (η), relativna gustoća (D_r), i normalno naprezanje (σ_v) (primjenjeni su za EPR modele za koeficijent bočnog pritiska tla pri mirovanju (K_0), i vrijednosti modula promjene volumena (m_v)).

5.1. Izrada modela za koeficijent bočnog pritiska tla pri mirovanju (K_0)

Kao bitan faktor u geotehničkom projektiranju, važno je izračunati koeficijent bočnog pritiska tla u projektiranju svih vrsta potpornih zidova, procjeni posmične otpornosti i trenja na plaštu pilota, te interpretaciji *in situ* ispitivanja. Pokazano je da se K_0 dramatično smanjuje s povećanjem postotka HDPE komadića, vertikalnim opterećenjem i relativnom gustoćom skeleta HDPE komadića. Povećanjem vertikalnog opterećenja ili relativne gustoće skeleta stvara se gušći skelet smjese zbog njezine zbijenosti.

Podaci velikog edometra (K_0), uključujući podatke za uzorak s HDPE-om i bez njega, korišteni su za razvoj regresijskih modela pomoću EPR-a (slika 5.).

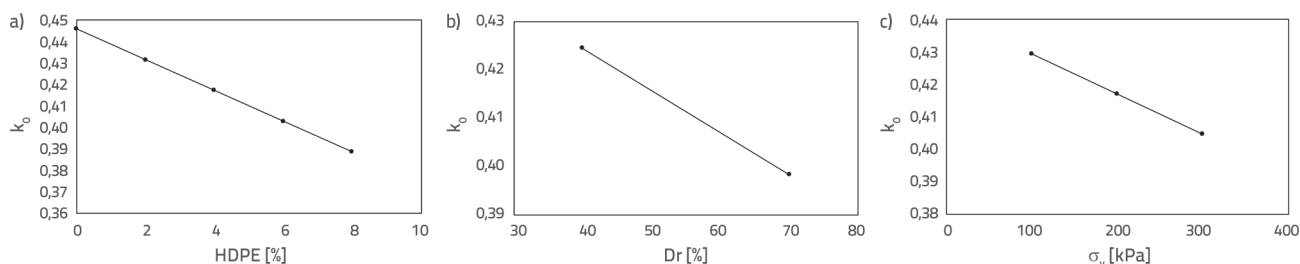


Slika 5. Podaci velikog edometra (K_0), $D_r = 40, 70\%$, $\sigma_v = 100, 200, 300$ kPa, $\eta = 0, 2, 4, 6, 8\%$

Rezultati koeficijenta bočnog pritiska tla mješavine u ispitivanju pomoću velikog edometra korišteni su za razvoj EPR modela. Na temelju vrijednosti COD pokazano je da hiperbolička sekantna relacija bolje predstavlja odnos između ulaznih i izlaznih parametara kada se uspoređi s ostalim relacijama. Relacija dobivena evolucijskom polinomnom regresijom prikazana je na sljedeći način:

$$K_0 = -0.00052409D_r + 1037925.954\sigma_v^{0.5}sh(\eta)sh(D_r)^{0.5} - 1.6564e^{-5}\sigma_v D_r^{0.5} - 0.071319\sigma_v^2 D_r^2 \cdot sh(D_r)^{0.5} - 0.00012979\eta\sigma_v + 0.49906 \quad (10)$$

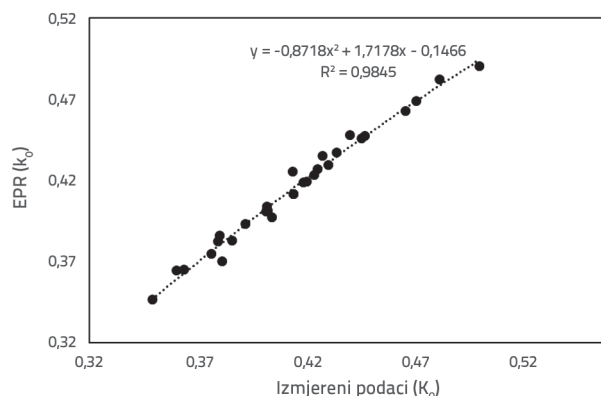
Za validaciju provedene su analize osjetljivosti kako bi se ispitala sposobnost generalizacije (robustnost) EPR modela u dedukciji temeljnog fizičkog značenja problema i kako bi se istražila važnost ulaznih podataka modela. U tu svrhu sve su ostale varijable fiksirane na srednje vrijednosti i promjenom jedne varijable, njezin je učinak na K_0 i m_v istražen. Sintetički podaci generirani su podizanjem njihovih vrijednosti za postotak ukupnog minimalnog i maksimalnog raspona. Zatim su te ulazne vrijednosti unesene u EPR modele i postignuti su odgovarajući izlazni rezultati. Ovaj proces je ponavljan za svaku sljedeću



Slika 7. Rezultati parametarske analize za koeficijent bočnog pritiska tla u mirovanju (K_0)

ulaznu varijablu dok se odgovor modela nije provjerio za sve ulaze. Izdržljivost modela je zatim procijenjena ispitivanjem koliko su dobro predviđeni izlazni rezultati u skladu s postojećim eksperimentalnim rezultatima.

Slika 6. prikazuje usporedbu rezultata najbolje razvijenog EPR-a i eksperimentalnih podataka. Vodoravna os predstavlja koeficijent bočnog tlaka izmjeren edometrom, a okomita os predstavlja koeficijent bočnog tlaka izračunan iz EPR formule, izraz (9). Sljedeća formula prikazuje odnos između laboratorijskih rezultata i EPR-a. Izraz (11) i slika 6. pokazuju izvrsne performanse razvijenog EPR modela.



Slika 6. Usporedba izmjerenih i predviđenih performansi za bočni pritisak tla mješavine HDPE-a i pijeska iz ispitivanja velikim edometrom

$$EPR(K_0) = -0,8718 [\text{izmjereno } (K_0)]^2 + 1,7178 [\text{izmjereno } (K_0)] - 0,1466 \quad (11)$$

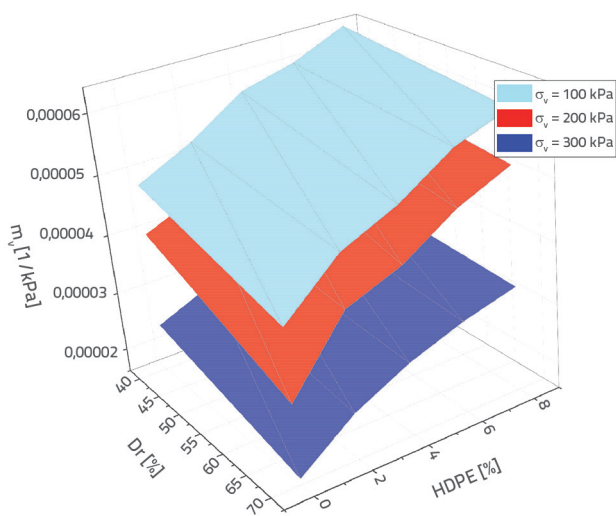
Istraženi su učinci parametara (D_r , $\eta(\%)$ i σ_v) K_0 i m_v . Kao što je već spomenuto, ispitivanja su provedena na 30 uzoraka s dvije relativne gustoće (40 % i 70 %), pet različitih postotaka HDPE komadića (0, 2, 4, 6, 8 %) i pod tri vrijednosti tlaka (100, 200 i 300 kPa). Slika 7. ilustrira rezultate parametarskog istraživanja odvojenog učinka promjene (D_r , $\eta(\%)$ i σ_v) na K_0 . Kao što je predviđeno predloženim modelom i prikazano na slici 7.a (pet točaka: 0, 2, 4, 6, 8 %), povećanje postotka HDPE komadića smanjilo je vrijednosti koeficijenta bočnog pritiska tla u mirovanju (K_0) zbog elastične deformabilnosti HDPE-a. Veća relativna gustoća i čvrstoća strukture uzrokovale su manju K_0 vrijednost zbog povećane interakcije između čestica pijeska i

progušćenja (slika 7.b, dvije točke: 40, 70 %). Za veće vertikalno opterećenje, krutost je povećana zbog stlačenog HDPE-a i skeleta pijeska, tako da je vrijednost K_0 bila niža pri većem naprezanju (slika 8.c, tri točke: 100, 200, 300 kPa).

Povećanje relativne gustoće mješavine HDPE-a i tla smanjilo je koeficijent bočnog pritiska tla mješavine, što je slično učinku povećanja relativne gustoće na koeficijent bočnog pritiska tla čistog pijeska i mješavine pijeska i gume, navode Jamshidi i sur. [25].

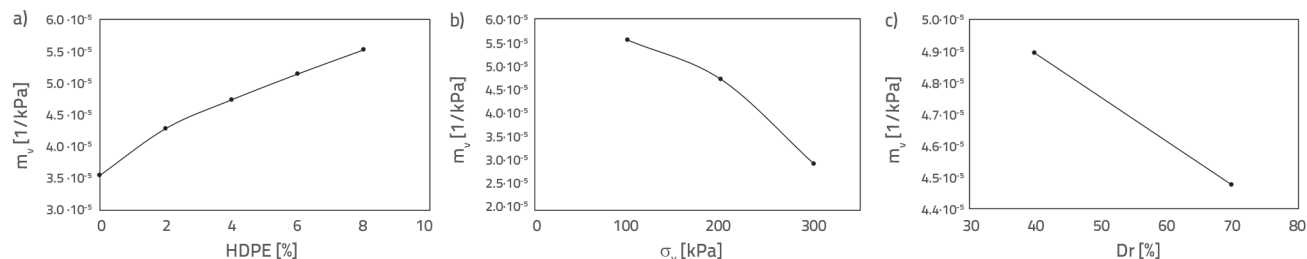
5.2. Izrada modela za modul promjene volumena (m_v)

Kada su tla podvrgnuta jednolikom opterećenju na velikim površinama kao što su nasipi i široki temelji, karakteristike stišljivosti obično su vrlo važne. Stišljivost pod jednodimenzionalnim pritiskom može se opisati na temelju smanjenja volumena šupljina s povećanjem efektivnog naprezanja. Podaci velikog edometra (m_v), uključujući podatke za uzorak s HDPE-om i bez njega, korišteni su za razvoj regresijskih modela pomoću EPR-a (slika 8.).



Slika 8. Podaci velikog edometra (m_v), $D_r = 40, 70$ %, $\sigma_n = 100, 200, 300$ kPa, $\eta = 0, 2, 4, 6, 8$ %

Na temelju slike 8., modul promjene volumena mješavine HDPE komadića i pijeska ovisi o ekvivalentnoj čvrstoći mješavine, na koju utječu postotak HDPE komadića, vertikalno opterećenje i relativna gustoća skeleta. Zbog manje krutosti HDPE-a, očekuje



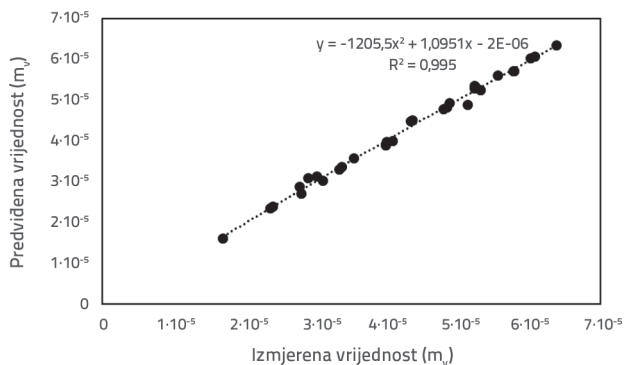
Slika 10. Rezultati parametarske analize modula promjene volumena (m_v)

se veća deformabilnost i stišljivost. Međutim, relativna gustoća skeleta i vertikalno opterećenje djeluju na sličan način. Rezultati su pokazali da će povećanje vertikalnog opterećenja povećati relativnu gustoću skeleta, uzrokovati gušći skelet pijeska i potaknuti progušćenje mješavine, tako da modul promjene volumena opada s vertikalnim opterećenjem.

Eksperimentalni rezultati modula promjene volumena (m_v) mješavina za različite parametre (η , D_r , σ_v) primijenjeni su za razvoj regresijskog ERP modela. Relacija je odabrana na temelju COD-a, jednostavnosti i robusnosti relacije za predviđanje modula promjene volumena tla pomiješanog s HDPE-om.

$$m_v = -2,4054 \times 10^{-9} D_r - 2,9893 \times 10^{-10} \sigma_v^2 + 6,5281 \times 10^{-8} \eta D_r + 1,4821 \times 10^{-9} \eta \sigma_v - 4,2942 \times 10^{-11} \eta \sigma_v^2 + 5,4733 \times 10^{-5} \quad (12)$$

Slika 9. prikazuje usporedbu rezultata razvijenog EPR-a i eksperimentalnih podataka. Horizontalna os predstavlja modul promjene volumena izmjeren pomoću edometra, a okomita os predstavlja modul promjene volumena dobiven iz EPR formule.



Slika 9. Usporedba izmjerenih i predviđenih performansi za modul promjene volumena mješavine HDPE-a i pijeska iz ispitivanja velikim edometrom

Izraz (13) prikazuje odnos između laboratorijskih rezultata i EPR-a koji upućuje na izvrsnu izvedbu razvijenog EPR modela.

$$EPR(m_v) = -1205,5 [izmjereno (m_v)]^2 + 1,0951 [izmjereno (m_v)] - 2 \times 10^{-6} \quad (13)$$

Rezultati parametarske studije na slici 10.a pokazuju da je povećanje postotka HDPE komadića dovelo do nelinearnog

povećanja modula promjene volumena (m_v). Štoviše, povećanje skeletne relativne gustoće i vertikalnog opterećenja rezultiralo je linearnim i nelinearnim smanjenjem modula promjene volumena (slike 10.b i 10.c), što je u skladu s eksperimentalnim rezultatima.

6. Zaključak

U današnje je vrijeme povećanje kapaciteta postupanja s plastičnim otpadom jedan od najvećih izazova s kojima se svijet suočava. Kako bi se smanjila potražnja za lokacijama odlagališta, ovo je istraživanje ispitivalo ponovnu upotrebu plastičnog otpada pomoću velikog edometra i razvijen je EPR model za procjenu karakteristika deformabilnosti tla pomiješanog s HDPE-om. Veliki edometar je prevladao dva glavna ograničenja

edometra standardne veličine (tipa Casagrande), uključujući ograničenje najvećeg promjera čestica uzorka i ograničenje veličine primijenjenog vertikalnog opterećenja. EPR je korišten za dobivanje odnosa između koeficijenta bočnog pritiska tla u mirovanju i modula promjene volumena s količinom HDPE-a (η), relativne gustoće (D_r) i normalnih opterećenja (σ_v). EPR tehnika pružila je pouzdano i postojano predviđanje modula promjene volumena i koeficijenta bočnog pritiska tla u mirovanju, s visokom točnošću kada se uspoređi s rezultatima laboratorijskih ispitivanja mješavine HDPE-a i pijeska. Ovi rezultati otkrivaju da se, osim što predstavljaju optimalan način rješavanja problema nedovoljnog zbrinjavanja plastičnog otpada, mješavine HDPE-a i pijeska mogu koristiti kao materijal za potporne zidove zbog manjih zahtijevanih vrijednosti K_0 .

LITERATURA

- [1] Ackerman, F.: Waste management and climate change, *Local Environment*, 5 (2000) 2, pp. 223–229
- [2] United States Environmental Protection Agency: Understanding global warming potentials, Greenhouse gas emissions, <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>, 15.9.2021.
- [3] Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I.P.S., Feo, L., Fraternali, F.: Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications, *Composites Part B* 2016, (2017), pp. 409–422
- [4] Choudhary, A.K., Jha, J.N., Gill, K.S.: Utilization of plastic wastes for improving the sub-grades in flexible pavements, *GeoShanghai International Conference*, 2010., pp. 320–326
- [5] Kalumba, D., Chebet, F.C.: Utilisation of polyethylene (plastic) shopping bags waste for soil improvement in sandy soils, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 2013.
- [6] Kumar, T., Panda, S., Hameed, S., Maity, J.: Behaviour of soil by mixing of plastic strips, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5 (2018), pp. 2578–2581
- [7] Rakic, D., Basaric, I., Caki, L., Coric, S.: Contribution to the geotechnical classification of municipal waste landfills in Serbia, *Environmental Geotechnics*, 7 (2020) 7, pp. 501–511
- [8] Abukhattala, M., Fall, M.: Geotechnical characterization of plastic waste materials in pavement subgrade applications, *Transportation Geotechnics*, 27 (2021), 100472.
- [9] Aswad, Hassan, H.J., Rasul, J., Samin, M.: Effects of plastic waste materials on geotechnical properties of clayey soil, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, (2021) 8, pp. 391–413
- [10] Giustolisi, O., Savic, D.A.: Advances in data-driven analyses and modelling using EPR-MOGA, *Journal of Hydroinformatics*, (2009), pp. 225–236
- [11] Giustolisi, O., Savic, D.A.: A Symbolic Data-driven technique based on evolutionary polynomial regression, *Journal of Hydroinformatics*, 3 (2006) 8, pp. 207–222
- [12] Rezanian, M., Faramarzi, A., Javadi, A.A.: An evolutionary based approach for assessment of earthquake-induced soil liquefaction and lateral displacement, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 24 (2011) 1, pp. 142–153, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.09.010>
- [13] Ghaboussi, J., Garret, J.H., Wu, X.: Knowledge-based modelling of material behaviour with neural networks, *Journal of Engineering Mechanics Division*, 117 (1991) 1, pp.153–164
- [14] Bruno, D.E., Barca, E., Goncalves, M., Passarella, G.: Evolutionary polynomial regression model for the prediction of coastal dynamics, 6th *EnvImeko – IMEKO TC19 – Second Edition*, 2016., pp. 6–11
- [15] Ahangar-Asr, A., Faramarzi, A., Javadi, A.: A new approach for prediction of the stability of soil and rock slopes, *Engineering Computations*, 27 (2010) 7, pp. 878–93
- [16] Faramarzi, A., Mehravar, M., Veladi, H., Javadi, A.A., Ahangar-Asr, A., Mehravar, M.: A hysteretic model for steel plate shear walls, *Proceedings of the 19th ACME Conference*, Edinburgh, Heriot-Watt University, 2011.
- [17] Ahangar-Asr, A., Faramarzi, A., Mottaghifard, N., Javadi, A.A.: Modeling of permeability and compaction characteristics of soils using evolutionary polynomial regression, *Computers & Geosciences*, 37 (2011) 11, pp. 1860–1869
- [18] Ahangar-Asr, A., Johari, A., Javadi, A.A.: An evolutionary approach to modelling the soil–water characteristic curve in unsaturated soils, *Computers & Geosciences*, 43 (2012), pp. 25–33
- [19] Keramati, M., Sina Khodabakhsh Reshad, S., Asgarpour, S., Tutunchian, M.A.: Predicting shear strength of municipal waste material by evolutionary polynomial regression (EPR), *EJGE*, (2014), pp. 53–69
- [20] Salehi-Khoshkroudi, S., Gholami, M., Ziatabar, M., Ramezani, M.: Prediction of soil saturated water content using evolutionary polynomial regression (EPR), *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60 (2014) 8, pp. 1155–1171
- [21] Karimnader-Shalkouhi, S., Karimpour-Fard, M., Lashteh Neshaei, M.A.: Evolutionary polynomial regression-based models to estimate stability of gravity hunched back quay walls, *AUT Journal of Civil Engineering*, 2 (2018) 1, pp. 79–86
- [22] Arabani, M., Pedram, M.: Laboratory investigation of rutting and fatigue in glassphalt containing waste plastic bottles, *Construction and building materials*, (2016), pp. 378–383
- [23] Terzaghi, K.: *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, NewYork, 1943.
- [24] Mokhtari, M., Shariatmadari, N., Heshmati, A., Salehzadeh, H.: Design and fabrication of a large-scale oedometer, *Journal of Central South University*, (2015), pp. 931–936
- [25] Jamshidi Chenari, R., Alaie, R., Fatahi, B.: Constrained compression models for tire-derived aggregate-sand mixtures using enhanced large scale oedometer testing apparatus, *Geotechnical and Geological Engineering*, 37 (2019), pp. 2591–2610