

Suvremeni praktični postupci proračuna pilota

Modern practical methods for pile analysis

T. Ivšić, A. Szavits-Nossan & E. Ocvirk

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb

SAŽETAK: Uvođenje Eurokoda 7 u domaću geotehničku praksu zahtijeva i reviziju pojedinih dijelova postojeće regulative. U dosadašnjoj hrvatskoj normi temeljenje na pilotima je obrađeno relativno šturo i nepotpuno u odnosu na razvoj znanja i projektnih postupaka u svijetu. Za vertikalnu nosivost postojeći izrazi zasnovani na teoriji plastičnosti ne obuhvaćaju sve bitne vidove različitih vrsta pilota u raznim vrstama tla i stijene, a za poprečna opterećenja navedene odredbe su vrlo općenite. U radu se ukratko prikazuju suvremeni postupci proračuna pilota na vertikalno i horizontalno opterećenje. Ovi postupci zasnovani su na rezultatima probnih opterećenja, uključuju i procjene razvoja pomaka pri nanošenju opterećenja i prilagodljivi su konceptu graničnih stanja propisanom Eurokodom.

Ključne riječi: geotehnika, norma, piloti, nosivost, metode

ABSTRACT: Implementation of Eurocode 7 into Croatian geotechnical practice demands the revision of existing codes. In actual Croatian geotechnical Code modern design procedures for pile foundations analyses are not included. The formulas for vertical resistance are based on plasticity theory and do not reflect essential aspects of various types of pile in soils and rocks. The transversal loading of piles is included in very general way. In this paper modern methods for axial and transversal pile loading are presented. These procedures are based on static loading test results, they include the estimate of load-settlement curve and they are compatible with limit state concept prescribed by Eurocode 7.

Keywords: geotechnics, code, piles, resistance, methods

1 UVOD

Stupanjem na snagu Tehničkog propisa za betonske konstrukcije 2006. godine u hrvatsku konstruktorsku regulativu uključena je i europska prednorma za geotehničko projektiranje (HRN ENV 1997-1, prosinac 2001). Ova prednorma zamijenjena je 2004. godine novom europskom normom (Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 1.dio: Opća pravila, EN 1997-1:2004) koja donosi znatne promjene i novine u odnosu na prednormu (Szavits-Nossan, Ivšić, 2006).

Uvođenje europskih normi u domaću geotehničku praksu zahtijeva i reviziju postojeće regulative (prvenstveno odredbi Pravilnika o tehničkim normativima za temeljenje građevinskih objekata, HRN 1990, sl.list 15-295). Konceptualno usklađivanje geotehničkog projektiranja sa sustavom konstruktorskog projektiranja (Eurokodovi), ali i usklađivanje tog koncepta s postojećim pristupima projektiranju u vodećim europskim zemljama, donosi u hrvatsku

geotehničku praksu znatne promjene. Sama norma ne propisuje detaljne postupke, nego donosi načela i kriterije koje treba uvažiti. Time je omogućena primjena raznovrsnih metoda i pristupa, kao i postojećih lokalnih iskustava, ali također podrazumijeva poznavanje novijih istraživanja u struci kako bi se u konkretnim projektnim situacijama mogla provjeriti usklađenost s propisanim načelima ili kriterijima.

2 TEMELJENJE NA PILOTIMA

2.1 *Temeljenje na pilotima*

Temeljenje građevina na pilotima ima sve učestaliju primjenu, kako zbog izvedbe sve zahtjevnijih konstrukcija, tako i zbog većeg korištenja (geotehnički) nepovoljnijih lokacija, te razvoja novijih tehnoloških rješenja koja omogućuju tržišnu atraktivnost i konkurentnost.

Zbog zatvorenosti tržišta u bivšoj državi, domaći izvođači bili su orijentirani uglavnom na jednu tehnologiju izvođenja (bušeni piloti), dok su primjene drugih tehnologija izvedbe pilota bile sporadične. U drugim zemljama s većom konkurencijom na tržištu ili drugačijom tradicijom znatna je primjena i drugih postupaka izvedbe (posebice raznih vrsta zabijenih pilota). Raznovrsnost izvođačke prakse i potreba za tržišnom konkurentnošću potaknuli su i istraživanja, te razvoj projektantskih metoda i prakse.

Sakupljena znanja i iskustva obuhvaćena su i odgovarajućim normama ili pravilnicima, pa se u razvijenim zemljama postepeno mijenjala i mjerodavna geotehnička regulativa. Za razliku od tih zemalja, u našoj zemlji je ostao u primjeni Pravilnik s relativno šturim odredbama glede projektiranja pilota i s konceptima od prije tridesetak godina. Iako EC7 predstavlja novinu i za europske projektante, jaz između aktualnih i budućih propisa je bitno manji u europskoj nego u hrvatskoj projektantskoj praksi.

Prema Eurokodu 7 (odredba 7.4.1) gotovo svi prihvatljivi postupci za projektiranje pilota moraju neposredno ili posredno biti zasnovani na rezultatima statičkih probnih opterećenja pilota. Ti projektni postupci su: a) neposredno ispitivanje probnih pilota, b) empirijske ili analitičke proračunske metode čija je valjanost potvrđena na statičkim probnim opterećenjima u usporedivim situacijama i c) rezultati dinamičkih udarnih pokusa čija je valjanost potvrđena statičkim probnim opterećenjima u usporedivim situacijama. Izuzetno je dopušteno za projektiranje koristiti i rezultate praćenja ponašanja usporedivog temelja na pilotima uz uvjet da su rezultati monitoringa potkrijepljeni i geotehničkim istraživanjem i ispitivanjem tla.

Ovo načelo odnosi se kako na tlačna, tako i na vlačna i horizontalna opterećenja pilota. Zasnovano je na spoznajama da na mjerodavne aspekte ponašanja pilota bitno utječe tlo neposredno uz pilot koje se poremećuje prilikom izvedbe i čija svojstva se razlikuju od onih određenih geotehničkim istraživanjima. Također i teorije kojima se to ponašanje (interakcija tlo-pilot) opisuje sadrže znatne idealizacije i pojednostavljenja. Budući da način izvedbe utječe na ponašanje pilota i okolnog tla, za pouzdanu procjenu budućeg ponašanja i pouzdane ocjene zalihe sigurnosti iskazane parcijalnim koeficijentima potrebno je uvjerljivo usporedivo iskustvo ili odgovarajuće neposredno mjerenje pilota u tlu.

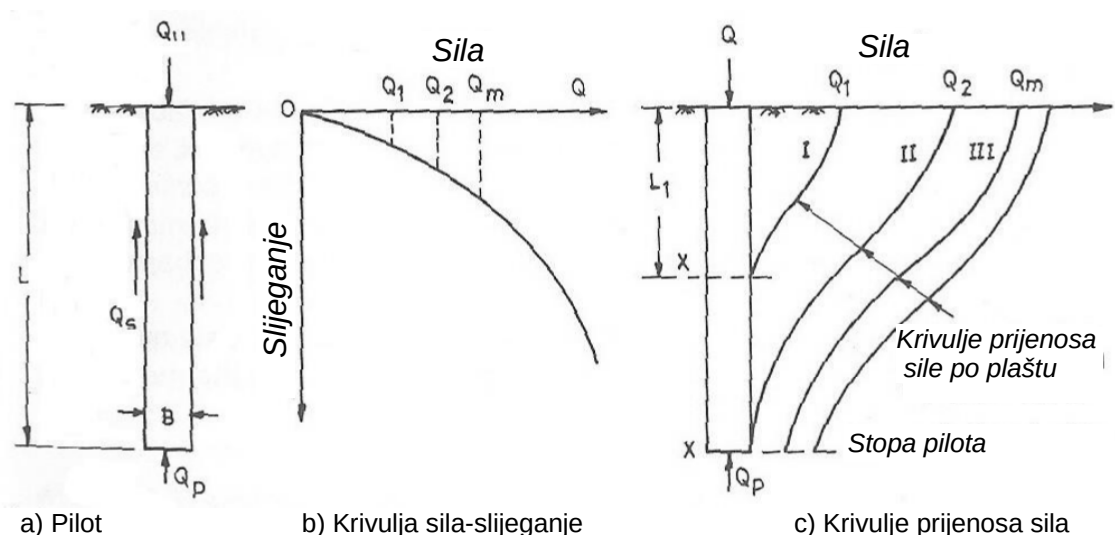
Ovo načelo je teško primjenjivo u domaćoj praksi, budući da kod nas ima vrlo malo rezultata probnih opterećenja pilota koji bi predstavljali usporedive situacije za projektiranje ili "kalibriranje" proračunskih metoda. Stoga će i jedan od dugoročnih zadataka domaćih izvođača i projekatanta biti prikupljanje odgovarajuće baze podataka probnih opterećenja pilota, kako bi se postigla odgovarajuća verifikacija postupaka i usklađenost s načelima Eurocoda.

2.2 Nosivost pilota na vertikalnu tlačnu silu

Osnovna je uloga pilota da podupiru gornju konstrukciju i prenesu vertikalno opterećenje u tlo, pa je stoga i težište projektiranja temelja na pilotima upravo na provjerama osno opterećenih pilota. I u Eurokodu 7 ovom aspektu je posvećena odgovarajuća pozornost.

Pojam "otpor ili nosivost temeljnog tla" (ground resistance) korišten u poglavlju 7 odnosi se na nosivost pilota tj. na maksimalnu reakciju temeljnog tla (maksimalni otpor plašta i maksimalni otpor stope pilota) koja se suprotstavlja djelovanju (akciji) koja se prenosi na temeljno tlo (kroz pilot). Projektni otpor (nosivost) i projektno djelovanje načelno se uspoređuju na razini površine temeljnog tla (težina pilota na strani djelovanja približno se poništava s pritiskom tla na stopi pilota koji je uključen u otpor na stopi – osim u slučajevima znatnijeg negativnog trenja, lakog tla ili produžetka pilota iznad razine tla).

Sam prijenos vertikalnog opterećenja kroz pilot u okolno tlo predstavlja složenu interakciju (slika 1) i pretpostavka o istovremenom dosizanju otpora plašta i stope predstavlja bitno pojednostavljenje, jer se maksimumi dosežu pri različitim veličinama pomaka. Stoga krivulja sila-pomak izmjerena na vrhu probno opterećenog pilota predstavlja jedini reprezentativni zbirni učinak svih zbivanja u tlu koji se može mjerodavno koristiti za prognoze ponašanja pri projektnim djelovanjima.



Slika 1 Mehanizam prijenosa opterećenja kroz pilot na tlo

Zbog toga i druge proračunske metode trebaju potvrdu valjanosti ili kalibraciju na rezultate probnih opterećenja. To je dovelo do toga da se u praksi danas koristi više metoda koje pojednostavljenim teoretskim izrazima i empirijskim korektivnim faktorima posredno obuhvaćaju složeno ponašanje pilota i tla. Za očekivati je da će s povećanjem broja korektno ispitanih pilota doći i do pojave novih empirijskih izraza. Posebice treba napomenuti da, u slučajevima gdje iz krivulje probnog opterećenja nije jasno vidljivo dosezanje sloma pri tlačnom opterećenju, Eurokode 7 preporuča pomak od 10% promjera pilota kao "kriterij sloma". To je važno utoliko što su različite proračunske metode izveden iz različitih kriterija sloma, pa će ih s vremenom trebati rekalibrirati na preporučeni kriterij.

Ovo je ujedno i kritika izraza za nosivost pilota iz još uvijek aktualnog domaćeg Pravilnika, u kojem se dopušteno opterećenje pilota računa iz izraza teorije plastičnosti i faktoriziranih parametara tla, bez obzira na način izvedbe pilota i korekcija na rezultate opažanja probnih pilota. Stoga ni pouzdanost ovih izraza nije poznata ili određiva. Budući da su izrazi u upotrebi

dugi niz godina bez poznatih slučajeva havarija temelja na pilotima, indirektno se može zaključiti da se izrazi primjenjuju konzervativno tj. s većom zalihom sigurnosti.

2.3 Neki suvremeni empirijski izrazi za određivanje vertikalne nosivosti pilota

U novijoj geotehničkoj literaturi navodi se više metoda za određivanje nosivosti pilota kojima se pojednostavljeno određuju otpori (nosivosti) po plaštu ili na stopi pilota iz parametara temeljnog tla (određenih laboratorijskim ili in situ pokusima).

U smislu definicija iz Eurokoda 7 razlikuju se postupci kojima se obuhvaća varijabilnost temeljnog tla i time varijabilnost nosivosti pilota na razmatranoj lokaciji. Osnovni pristup je tzv. "model pile" postupak, gdje se ukupne proračunske nosivosti pilota određuju pojedinačno, iz parametara tla dobivenih za svaku neposrednu lokaciju istraživanja, a zatim se primjenom korelacijskih faktora ζ , zavisnih o broju ispitanih mjesta, određuju karakteristične vrijednosti nosivosti za cijelu lokaciju (ili pojedina područja). Alternativni postupak je da se najprije sakupe i ocijene rezultati svih pokusa (s cijele lokacije ili pojedinih područja), a zatim se iz reprezentativnih rezultata odrede karakteristične nosivosti (plašta i stope zasebno) bez primjene korelacijskih faktora.

Upravo dobivene karakteristične vrijednosti nosivosti su ulazni podaci za projektne pristupe DA-1 i DA-2 (na koje se zatim primjenjuju primjereni parcijalni koeficijenti radi dobivanja projektne nosivosti). U pristupu DA-3 parcijalni koeficijenti primjenjuju se na karakteristične (materijalne) parametre tla, pa se s projektnim vrijednostima parametara tla direktno određuju projektne nosivosti.

Dolje navedeni izrazi za proračun nosivosti mogu se koristiti kao proračunske vrijednosti (model pile) ili se mogu smatrati karakterističnim vrijednostima.

Izrazi su preuzeti iz strane literature i u pravilu predstavljaju empirijske vrijednosti usklađene s mjerenjima na probnim pilotima. Kod nas nema dovoljno odgovarajućih vlastitih rezultata mjerenja na kojima bi se takovi empirijski postupci mogli provjeriti ili kalibrirati za širi spektar lokacija i uvjeta tla. Zbog toga ih treba shvatiti prvenstveno kao ilustraciju navedenih odredbi Eurokoda, te ih se eventualno može preporučiti kao dodatne postupke u projektiranju.

Treba također uzeti u obzir da su, u sredinama otkud izrazi dolaze, geotehnički istražni radovi u pravilu obilniji nego u našoj praksi (i po broju istražnih mjesta i po gustoći uzorkovanja i pokusa), pa su i ocjene varijabilnosti rezultata, kao i izbor karakterističnih vrijednosti parametara načelno pouzdaniji nego u nas.

Načelno je nosivost pilota za tlačnu silu, R_c jednaka zbroju nosivosti na stopi pilota, R_b i nosivosti po plaštu pilota, R_s .

$$R_c = R_b + R_s, \text{ a } R_b = A_b q_b \text{ i } R_s = \sum A_{s,i} q_{s,i}$$

gdje su: A_b i q_b - površina stope pilota i specifični otpor na stopi
 $A_{s,i}$ i $q_{s,i}$ - površina plašta pilota u sloju i i specifični otpor plašta u sloju i

1. ZABIJENI PILOTI (revidirana metoda API, 1987, prema Reese i dr, 2006)

1.a Koherentna tla

$q_b = 9 c_u$ c_u – prosječna nedrenirana čvrstoća ispod stope pilota na dužini dva promjera

$$q_{s,i} = \alpha c_u \quad \begin{aligned} \alpha &= 0.5 (c_u / \sigma'_{vo})^{-1/2} & \text{za } c_u / \sigma'_{vo} \leq 1 \\ \alpha &= 0.5 (c_u / \sigma'_{vo})^{-1/4} & \text{za } c_u / \sigma'_{vo} > 1, \text{ s ograničenjem } \alpha \leq 1 \end{aligned}$$

gdje su c_u , σ'_{vo} – nedrenirana čvrstoća i vertikalni efektivni pritisak na razmatranoj dubini

Ovi izrazi su utvrđeni na temelju ispitivanja pilota, a nedrenirane čvrstoće najbolje je odrediti iz troosnih UU pokusa.

1.b Nekoherentna tla

$$q_b = \sigma'_{vo, z=d} N_q \quad \begin{array}{l} \sigma'_{vo, z=d} - \text{vertikalni efektivni pritisak na stopi pilota, dubina temeljenja } d \\ N_q - \text{faktor nosivosti} \end{array}$$

$$q_{s,i} = K \sigma'_{vo} \tan \delta \quad \begin{array}{l} K - \text{koeficijent bočnog zemljanog pritiska} \\ \sigma'_{vo} - \text{vertikalni efektivni pritisak na razmatranoj dubini} \\ \delta - \text{kut trenja između tla i pilota} \end{array}$$

Tablica 1: Smjernice za silicijska tla

Vrsta tla	N (SPT)	N_q	$q_{b \max}$ (MPa)	δ (°)	$q_{s \max}$ (kPa)
Vrlo rahli pijesak- prah	0 - 4	8	2	15	50
Rahli do zbijeni pijesak-prah	4 - 10	12	3	20	70
Srednji do zbijeni pijesak-prah	10 - 30	20	5	25	85
Zbijeni do jako zbijeni pijesak-prah	30 - 50	40	10	30	95
Zbijeni do jako zbijeni šljunak	50 +	50	12	35	110

2. BUŠENI PILOTI

2.a Koherentna tla (prema Reese i dr, 2006)

$$q_b = N_c^* c_u \quad \text{za } d/b \geq 3 \quad d - \text{dubina temeljenja, dužina pilota u tlu, } b - \text{promjer pilota}$$

$$q_b = 2/3(1+d/6b) N_c^* c_u \quad \text{za } d/b < 3 \text{ (redukcija za blizinu površine terena)}$$

c_u – prosječna nedrenirana čvrstoća ispod stope pilota na dužini dva promjera.

Najbolje ju je odrediti iz triaksijalnih UU pokusa

Tablica 2. Vrijednosti N_c^* za bušene pilote u koherentnom tlu (prema Reese i dr, 2006)

c_u (kPa)	25	50	100	200	za $c_u > 200$ (vrijede izrazi za meke stijene)
N_c^*	6.5	8.0	8.7	9.0	

$$q_{s,i} = \alpha c_u \quad \alpha = 0.55 \quad \text{za } c_u/p_a \leq 1.5$$

$$\alpha = 0.55 - 0.1 (c_u/p_a - 1.5) \quad \text{za } 1.5 \leq c_u/p_a \leq 2.5$$

$$\text{za } c_u/p_a > 2.5 \text{ vrijede izrazi za meku stijenu}$$

c_u - nedrenirana čvrstoća na razmatranoj dubini ili sloju i ,

p_a - atmosferski pritisak (101,3 kPa)

- u proračunu R_s zanemariti gornjih 1.5m u sloju koherentnog materijala pri površini terena

- u proračunu R_s zanemariti donjih " b " metara ako je stopa pilota u koherentnom tlu

2.b nekoherentna tla (prema Reese i dr, 2006)

$$\begin{aligned} q_b &= 0.06 N_{60} (d / 10b) & \text{za } d / b \leq 10 \\ q_b &= 0.06 N_{60} & \text{za } d / b > 10 \end{aligned} \quad \text{maksimalna vrijednost } q_b = 3.0 \text{ MPa}$$

N_{60} – broj udaraca SPT korigiran na 60% teoretske energije

$$q_{s,i} = \beta \sigma'_{vo} \quad \text{maksimalna vrijednost } q_{s,i} = 200 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} \text{za pijeske} \quad \beta &= 1.5 - 0.25 z^{1/2} \text{ (m)} & 0.25 \leq \beta \leq 1.2 \\ &\beta = N_{60}/15 (1.5 - 0.25 z^{1/2}) & \text{za } N_{60} \leq 15 \end{aligned}$$

$$\text{za šljunke} \quad \beta = 2.0 - 0.15 z^{3/4} \text{ (m)} \quad 0.25 \leq \beta \leq 1.8$$

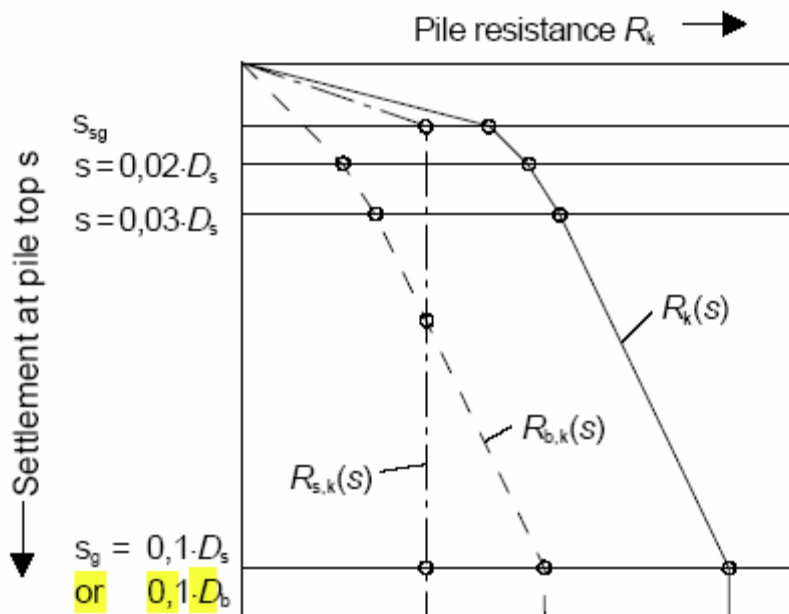
3. NOSIVOST BUŠENIH PILOTA U OVISNOSTI O SLIJEGANJU (DIN 1054, 2005)

U novom DIN 1054 iz 2005 godine predlaže se postupak određivanja karakteristične nosivosti bušenih pilota zasnovan na empirijskim vrijednostima i u ovisnosti o slijeganju vrha pilota. Pri tom su granične vrijednosti slijeganja (sлом) usklađene s kriterijima Eurokoda 7

Elementi karakteristične krivulje otpor (nosivost), R_k – slijeganje, s , do graničnog slijeganja prikazani su na slici 2. Zasebno se određuje nosivost na stopi ovisna o slijeganju $R_b(s)$ i nosivost na plaštu $R_s(s)$.

Granično (ili sломno) slijeganje za karakterističnu nosivost stope pilota $R_{b,k}(s_g)$ iznosi:

$$s_g = 0.1 D_s \text{ ili } s_g = 0.1 D_b, \quad D_s - \text{promjer plašta pilota, } D_b - \text{promjer baze pilota}$$



Slika 2. Karakteristična krivulja nosivost – slijeganje vrha pilota (DIN 1054: 2005)

Granično slijeganje (s_{sg}) pri dosezanju karakteristične nosivosti na plaštu $R_{s,k}(s_{sg})$ određuje se kao:

$$s_{sg} = 0.50 R_{s,k}(s_{sg}) + 0.50 \leq 3.00 \text{ cm}, \text{ pri čemu se vrijednost } R_{s,k}(s_{sg}) \text{ uvrštava u MN.}$$

Karakteristične nosivosti pilota za pojedine vrijednosti slijeganja sa slike 2 određuju se kao

$$R_k(s) = R_{b,k}(s) + R_{s,k}(s) = A_b q_{b,k} + \sum A_{s,i} q_{s,k,i}$$

Pri tom se karakteristični specifični otpori na stopi i plaštu pilota, $q_{b,k}$ i $q_{s,k,i}$, određuju prema tabeliranim vrijednostima kao funkcije prosječnog otpora na šiljku CPT, q_c , za nekoherentna tla i nedrenirane čvrstoće $c_{u,k}$ za koherentna tla (Tablice 3 i 4).

Vrijednosti karakterističnih specifičnih otpora iz tablica vrijede za bušene pilote, izvedene pomoću zacjevljenja ili isplake, ukopane barem 2.5m u nosivi sloj tla, te za promjere plašta ili stope pilota od 0.30 do 3.0 m.

Za primjenu tabeliranih karakterističnih vrijednosti otpora na stopi, $q_{b,k}$, pretpostavlja se da debljina nosivog sloja na razini stope pilota nije manja od 3 promjera stope i da iznosi najmanje 1.5m, te da je u tom području $q_c \geq 10 \text{ MPa}$ ili $c_{u,k} \geq 100 \text{ kPa}$.

Za nekoherentna tla u pravilu se koriste rezultati CPT, no dopušta se i primjena korelacija CPT s drugim penetracijskim pokusima.

Tablica 3. Specifični otpori na stopi pilota, $q_{b,k}$ u MPa

Normalizirano slijeganje vrha pilota, s/D	NEKOHERENTNA TLA Prosječni otpor na šiljku CPT, q_c (MPa)				KOHERENTNA TLA Nedrenirana čvrstoća $c_{u,k}$ (MPa)	
	10	15	20	25	0.100	0.200
		$q_{b,k}$ (MPa)			$q_{b,k}$ (MPa)	
0.02	0.70	1.05	1.40	1.75	0.35	0.90
0.03	0.90	1.35	1.80	2.25	0.45	1.10
0.10 (s_g)	2.00	3.00	3.50	4.00	0.80	1.50

Međuvrijednosti se mogu linearno interpolirati

Tablica 4. Specifični otpori na plaštu, $q_{s,k}$ u MPa

NEKOHERENTNA TLA		KOHERENTNA TLA	
Prosječni otpor na šiljku CPT, q_c (MPa)	Specifični otpor na plaštu $q_{s,k}$ (MPa)	Nedrenirana čvrstoća $c_{u,k}$ (MPa)	Specifični otpor na plaštu $q_{s,k}$ (MPa)
0	0	0.025	0.025
5	0.040	0.100	0.040
10	0.080	≥ 0.200	0.060
≥ 15	0.120		

Međuvrijednosti se mogu linearno interpolirati

2.4 Piloti opterećeni poprečnom silom i momentom

Prema Eurokodu 7 projektiranje poprečno opterećenih pilota mora biti konzistentno s drugim pravilima za projektiranje pilota. Treba razmotriti sljedeće mehanizme sloma:

- za kratke pilote, rotaciju i translaciju kao kruto tijelo
- za duge vitke pilote, slom savijanjem pilota zajedno s lokalnim popuštanjem i pomacima tla pri vrhu pilota

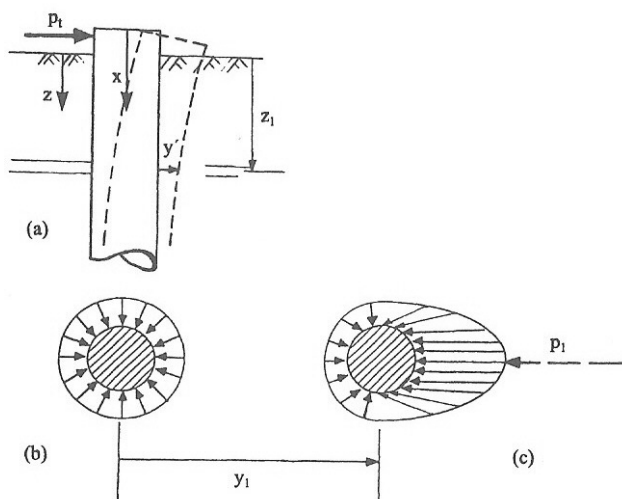
Za proračune poprečnih otpornosti temelja na pilotima treba upotrijebiti kompatibilan skup učinaka djelovanja konstrukcije, te reakcija i pomaka temeljnog tla. Za proračune dugih pilota prihvatljive su proračunske metode zasnovane na teoriji grede poduprte elastičnim oprugama karakteriziranim horizontalnim modulom reakcije podloge.

Prilikom ocjene poprečnih pomaka temelja na pilotima treba se uzeti u obzir: krutost tla i njegovu varijaciju s razinom deformacija, krutost pojedinih pilota, način povezivanja ili upetost u konstrukciju, grupne efekte i efekte ponovljenih ili cikličkih opterećenja.

Poprečno opterećeni temelji na pilotima predstavljaju izrazito složen problem interakcije tla, temelja i konstrukcije. Postizanje "kompatibilnog" skupa djelovanja i otpora u sustavu u kojem "svatko utječe na svakog" u smislu kompatibilnosti pomaka i redistribucije sila nije jednostavno, pa su i odredbe Eurocoda u tom poglavlju relativno šture. Navode se uglavnom bitni efekti koje treba uzeti u obzir, bez detaljnih odrednica i načina upotrebe parcijalnih koeficijenata.

Sam problem poprečno opterećenog pilota je 3-D problem (slika 3), a uzevši u obzir nelinearno ponašanje tla i promjene krutosti s pomakom i dubinom, te spominjane utjecaje načina izvedbe na tlo oko pilota, očito je da propis mora ostavit prostor projektantu da različitim postupcima ili kombinacijama postupaka uspostavi kompatibilan skup efekata djelovanja i reakcija. Eksplicitno spominjanje grede na oprugama kao prihvatljive proračunske metode predstavlja i realno današnje stanje ostvarive projektantske prakse za ovaj tip problema.

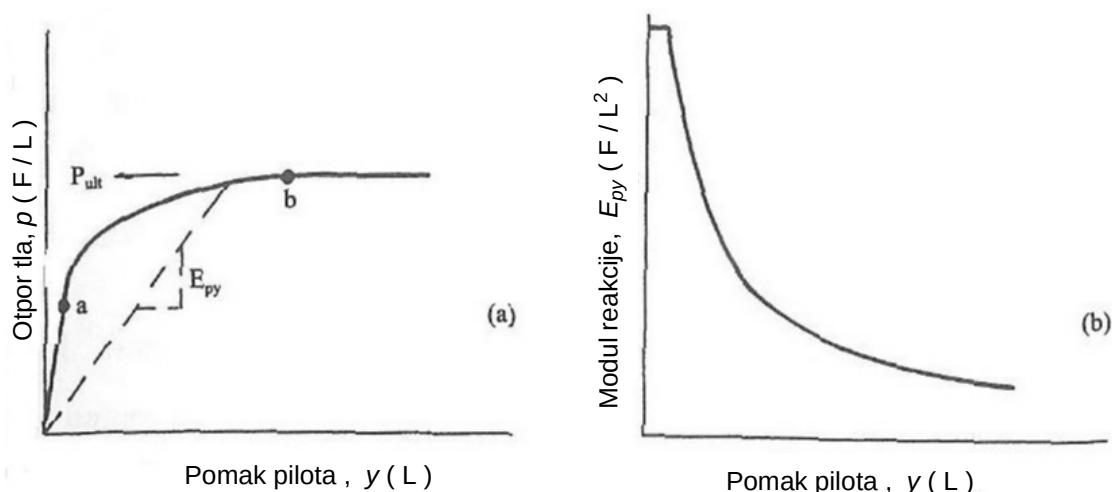
U zadovoljenju navedenih efekata koje treba uzeti u obzir kod poprečno opterećenih pilota najdalje je došla tzv. " $p - y$ metoda" (Reese i Van Impe, 2001), koja predstavlja generalizirani Winklerov model tj. gredu na oprugama čija je krutost promjenljiva s razinom pomaka i obuhvaća heterogenost po dubini. Metoda se počela razvijati u SAD još pedesetih godina prošlog stoljeća potaknuta problemom prognoze ponašanja stupova naftnih platformi u mekom morskom dnu.



Slika 3 Raspodjela pritisaka na pilotu prije i nakon horizontalnog pomaka y_l

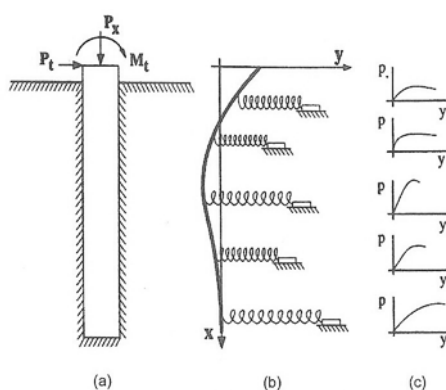
Na slici 3 prikazan je pilot opterećen horizontalnom silom (3a) i presjek kroz pilot i tlo na dubini z_l . Na slici 3b predočena je uniformna raspodjela normalnih (ovdje horizontalnih) naprezanja na stjenku pilota na dubini z_l prije opterećenja, a na slici 3c su naprezanja nakon pomaka y_l (povećana na prednjoj i smanjena na stražnjoj strani). Integracijom naprezanja po jedinici dužine dobije se veličina p_l ("otpor tla") koja djeluje suprotno pomaku y_l i ima dimenziju sila/dužina.

Tipična $p - y$ krivulja prikazana je na slici 4a, a nagib sekante ove krivulje E_{py} naziva se još i "modul reakcije podloge (za poprečno opterećeni pilot)". Budući da $p - y$ krivulje nisu isto što i naponsko-deformacijske krivulje nekog materijala (pomak y_l je *interakcijski* pomak pilota i tla), to i E_{py} nije parametar materijala (kao npr. modul elastičnosti), nego samo parametar pogodan za proračunski model interakcije. "Modul" E_{py} se mijenja (pada) s pomakom (slika 4b) i nije konstanta modela, kao što ni $p - y$ krivulje nisu konstantne duž pilota, nego odražavaju promjenljivost i heterogenost tla s dubinom (prema Reese i Van Impe, 2001).



Slika 4 Tipične $p - y$ krivulja i rezultirajući modul reakcije podloge

Na slici 5 prikazan je shematski proračunski model pilota (greda na oprugama promjenljive krutosti) i skup $p - y$ krivulja koje generiraju "module reakcije" duž pilota i zavisno o razini pomaka. Na osnovi većeg broja opažanih poprečno opterećenih probnih pilota u raznim uvjetima temeljnog tla, mnogi autori su predložili empirijske postupke za određivanje familija $p - y$ krivulja. Takvi postupci koji u sebi uključuju i mjerljive parametre tla (npr. parametre čvrstoće), a kalibrirani su na probnim pilotima, daju mogućnost da se u sličnim uvjetima koriste i za projektantske svrhe. Objavljenim postupcima posredno su obuhvaćeni i efekti cikličkih opterećenja, te djelovanja nametnutih pomaka (npr. kod klizišta) na pilote.



Slika 5 Model poprečno opterećenog pilota sa skupom $p - y$ krivulja: a) opterećeni pilot. b) modeliranje tla oprugama. c) $p - y$ krivulje

Metoda je implementirana u razmjerno jednostavne računalne programe, kojima je moguće "računati" poprečno opterećene pilote za razne kombinacije djelovanja, a također i grupe pilota u kojima se mogu korektno obuhvatiti simultana djelovanja vertikalnih i horizontalnih sila i momenata u prostoru.

Problem nelinearnog prijenosa sila za osno opterećenje u funkciji pomaka (slika 1), te razdvojeno ponašanje otpora uz plašt i otpora na stopi pilota obuhvaćeno je tzv. " $t - z$ metodom",

koja također koristi koncept nelinearnih opruga uzduž pilota. Time se u proračune grupa pilota mogu uključiti nelinearna ponašanja tla i pilota kako u poprečnom, tako i u uzdužnom smjeru.

3 ZAKLJUČAK

Uvođenje novog geotehničkog propisa Eurokoda 7 u domaću projektantsku praksu povlači za sobom i potrebu za upoznavanjem s novijim istraživanjima u struci. Za temeljenje na pilotima osnovni pristup Eurokoda 7 je određivanje nosivosti na osnovi probnih statičkih opterećenja ili empirijskih proračunskih postupaka čija je valjanost potvrđena na probnim pilotima u usporedivim situacijama.

Budući da su takova ispitivanja nepraktična i skupa za svakodnevno projektiranje, ona ostaju dugoročni zadatak za projektante i izvođače, kako bi se postiglo stvarno usklađivanje s propisom, te i u Hrvatskoj prihvatile i verificirale ili razvile prikladne metode za ekonomično projektiranje temelja na pilotima.

U drugim sredinama su razvijeni postupci kalibrirani na rezultate opažanja, pa se u radu predstavljaju neke od tih metoda kao ilustracija ili mogućnost korištenja kao dodatne metode u geotehničkom projektiranju.

POPIS LITERATURE

- BS EN 1997-1:2004; Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules. British standard.
 DIN 1054; Sicherheit im Erd- und Grundbau, Englische Fassung der DIN 1054 (Schlussmanuskript Oktober 2005), NA 005 Normenausschuss Bauwesen (NABau)
 Reese, L.C., Van Impe, W.F. 2001. *Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading*. Leiden. Balkema
 Reese, L.C., Isenhower, W.M., Wang, S.T. 2006. *Analysis and design of shallow and deep foundations*. John Wiley&Sons, N.Y. USA
 Szavits-Nossan, A., Ivšić, T. 2006. Novi Eurokode 7: Geotehničko projektiranje. *Priopćenja 4. Savjetovanja Hrvatskog geotehničkog društva*, Opatija