

UDK:624.131.54(045)

ODREĐJIVANJE OPTIMALNIH DIMENZIJA TEMELJA NA
OSNOVU MAKSIMALNOG DOZVOLJENOG OPTEREĆENJA U
POGLEDU LOMA TLA I SLEGANJA

- Mirosljub Samardaković -

Dozvoljeno opterećenje temeljnog tla (q_a) u praksi se određuje odvojeno za usvojeni faktor sigurnosti u pogledu loma tla i (redje) za dozvoljeno sleganje. U radu je izložen način određivanja jedinstvene i najveće vrednosti q_a na bazi oba kriterijuma. Predložena je izrada dijagrama q_a kao funkcije širine i dubine temelja, kao i postupak kojim se određuju neophodna dubina i optimalne dimenzije temelja ili potrebne dimenzije na datoj dubini, za dato opterećenje i oblik stope. Iz analize uradjenog primera vidi se da predloženi postupak, uz poželjno korišćenje skromne savremene računске tehnike, unapređjuje primenu konvencionalnih modela tla i mogućnosti za ocenu pojedinih uticaja u datim uslovima temeljenja.

1. PREDMET I METOD ANALIZE

U savremenoj stručnoj parksi, potrebne dimenzije plitkih temelja računaju se najčešće za poznatu dubinu fundiranja, zadatu geotehničkim i konstruktivnim uslovima. Za ove potrebe, u rutinski uradjenim geološko-geomehaničkim elaboratima, dozvoljeno opterećenje tla obično je određeno samo na osnovu opterećenja loma (graničnog opterećenja, nosivosti) i to prema klasičnom rešenju Terzaghi-ja, ma da je jugoslovenskim Pravilnikom o temeljenju (1974) - čije je osavremenjivanje u toku - za to predložena varijanta u svetu opšteprihvaćenog i obuhvatnijeg rešenja Brinch Hansen-a. Ovo drugo rešenje najčešće se "izbegava" jer da je veće vrednosti dozvoljenog opterećenja u pogledu loma tla, za koje se može očekivati znatnije sleganje temelja a za analizu sleganja nedostaju često svi podaci o tlu i objektu, kriterijumi za ocenu sleganja a neretko i stručna kompetencija autora.

I kada izuzmemo slučajeve štetnih deformacija objekata (kojima su umanjeni ili ugroženi stabilnost, funkcionalnost i izgled) zbog dejstva susednih objekata i drugih uticaja, pokazuje se da je uzrok štetnih deformacija češće nedozvoljeno veliko sleganje a znatno redji uzrok je "prekoračenje" opterećenja loma - nosivosti tla (kada su oštećenja obimnija ili dolazi do kolapsa objekta).

Zbog toga, kako je poznato, u konvencionalnim proračunima treba dozvoljeno opterećenje tla (q_a) ispod plitkog temelja usvojiti na osnovu dva kriterijuma: odabranog faktora sigurnosti (F_s) u pogledu loma tla, i dozvoljenog sleganja (apsolutnog s_{doz} i/ili relativnog - diferencijalnog Δs_{doz}) datog temelja.

Pošto je predmet ovog rada primena tih kriterijuma a ne i njihov izbor, u daljem tekstu navešćemo samo odabrane reference za izbor vrednosti F_s i dozvoljenog sleganja.

U vezi F_s , Széchy i Varga (1978) analiziraju izvršena i ukazuju na potrebna dalja istraživanja, navodeći brojne autore. Uobičajene veličine F_s navodi npr. Habib (1973), sažeto i lucidno ih vezujući za fizičko-mehaničke uslove sredine. Umesto jedinstvenog faktora (kakav se primenjuje za rešenje Terzaghi-ja) sve više opravdanja stiče primena parcijalnih faktora sigurnosti (npr. F_{sc} i $F_{s\varphi}$ kao prema jugoslovenskom Pravilniku) kojima se uvažava realnost da pri radnim naponima pod q_a sve komponente otpornosti na smicanje tla nisu mobilisane jednako.

Dozvoljene veličine apsolutnog i diferencijalnih sleganja, s obzirom na prirodu ovog uticaja na objekte, ne mogu se dati precizno i univerzalno. Kao kriterijume za odredjivanje dozvoljenog opterećenja tla plitkim temeljima pomenuti autori (Széchy, Varga, 1978) analiziraju i sleganja. U literaturi širom sveta najviše se citiraju tabele Polshin-a i Tokar-a (1957) koje su ušle u sovjetske standarde ili su adaptirane (Lee, 1983), takođe i granice ugaone distorzije za razne objekte, gde je rezime (napr. prema Pilot, Ramli, 1982) sačinio Bjerrum (1963). Analizu 98 istorijskih slučajeva deformacija objekata i zaključke sa kriterijuma (Skempton, Mac Donald, 1956) uglavnom potvrđuju i dopunjuju Grant i dr. (1974), koji predlažu radijus krivine deformisane površine kontakta temelj-tlo kao bolji kriterijum za izbor dozvoljenih sleganja. Veličine dozvoljenih sleganja analizira i Wahls (1981), sažeto ih navodi Philipponnat (1987) i dr.

Teorijski razlog za dovokriterijumsko određivanje dozvoljenog opterećenja tla je što se u konvencionalnim analizama tlo tretira kao kruto-plastično u proračunu opterećenja loma (metodama granične ravnoteže ili linija klizanja) a kao elastično za područje radnih napona u proračunu sleganja (metodama integracije pomeranja ili integracije napona i dr.), te na ovaj način opterećenje loma nije funkcija deformacije tla (sleganja). Takav problem ne postoji sa savremenim modelima tla, za koje se modernim numeričkim (i drugim) postupcima dobija jedinstvena veza opterećenja i deformacije do "loma". Ipak, ovi modeli kreirani su i proveravani samo za određene vrste i stanja tla pa njihovo konstituisanje i složeni proračuni u običnoj inženjerskoj praksi još nisu racionalni.

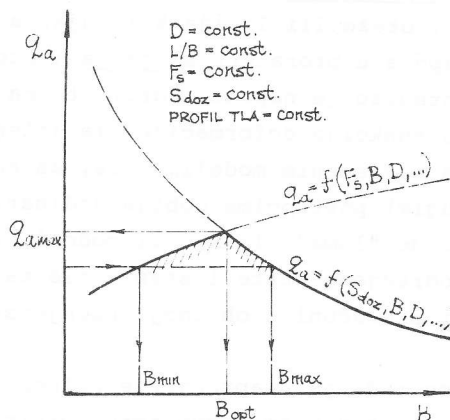
Predmet ovog rada je unapredjenje primene konvencionalnih modela tla postupkom kojim se dozvoljeno opterećenje tla određuje na osnovu oba kriterijuma (F_s i s_{doz}) a preko njegove najveće vrednosti i optimalne dimenzije temelja za datu dubinu fundiranja. Postupkom se predlaže ponavljanje proračuna za više dubina i izrada dijagrama sa koga se direktno očitavaju potrebne i optimalne dimenzije za željenu dubinu i opterećenje stope u datom tlu, za koje su ispunjeni zadati kriterijumi stabilnosti tla i sleganja.

Kroz analizu uradjenog primera konkretnije se mogu videti opravdanost i mogućnosti, kao i nedostaci i ograničenja predloženog postupka.

2. POSTUPAK ZA ODREĐIVANJE OPTIMALNIH DIMENZIJA I DUBINE TEMELJA

Kao što je poznato, za datu dubinu fundiranja (D) i jednake ostale uslove, sa porastom širine stope (B) dozvoljeno opterećenje u pogledu loma tla (q_a) raste dok se kontaktni pritisak (označen takodje sa q_a) koji "proizvodi" jednako (npr. granično dozvoljeno) sleganje (s_{doz}) smanjuje.

Ovakve dve funkcije, dozvoljena opterećenja u pogledu loma i sleganja, imaće tok kao na Sl.1. Pošto za svako B oba kriterijuma (F_s i s_{doz}) mora da budu zadovoljena, najveće vrednosti dozvoljenog opterećenja određene su funkcijom prikazanom debljom linijom, koja ima svoj maksimum ($q_{a\ max}$) za optimalnu širinu stope (B_{opt}) na datoj dubini (D).



Sl.1. Potrebna širina ($B_{\min}$ do $B_{\max}$) stope za dato q_a^* i optimalna širina (B_{opt}) sa najvećim dozvoljenim kontaktnim pritiskom ($q_{a \max}$) za datu dubinu (D)

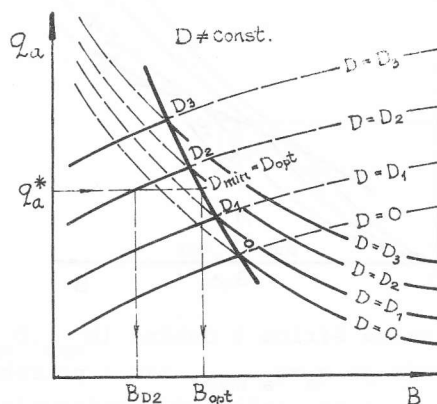
Odredjivanje $q_{a \max}$ za datu dubinu na ovaj način predlaže se, mada ne često, u savremenoj literaturi (npr. Bažant, 1979 ili De Beer, 1987) i nekim standardima (npr. DIN 1054 Beiblatt, 1976).

Za dati kontaktni pritisak (q_a^*), uz uslove kao na Sl.1, opravdano bi bilo usvojiti najmanju potrebnu širinu stope ($B_{\min}$) jer je veća neekonomična.

Za najčešći slučaj u praksi, kada su zadati dubina, vertikalna komponenta rezultante opterećenja (V_a^*) i njeni ekscentriciteti (e_B, e_L), funkcije q_a mogu se odrediti i za ekscentrične uticaje ali se potrebna širina (i preko nje dužina L) stope određuje sa Sl.1 indirektno, ponavljanjem pretpostavljanjem B , očitavanjem q_a i sračunavanjem $V_a = q_a B' L'$ ($B' = B - 2e_B$) sve dok se ne postigne $V_a \approx V_a^*$. Ovo nije pogodno u praksi i zbog toga što izbor dimenzija vrši konstrukter - statičar koji tada mora da se upušta u detalje geomehaničkih proračuna. Uz to, ovakav dijagram, koji bi bio dat u geomehaničkom elaboratu, važi samo za jednu - datu dubinu fundiranja.

Dozvoljeno opterećenje u pogledu loma i sleganja kao funkcija širine stope datog oblika ($L/B = \text{const.}$), sračunato za različite dubine fundiranja ($0, D_1, D_2, D_3$) daće snop krivih kao na

Sl.2. Kroz prelomne tačke, koje odgovaraju vrhnosti $q_a \max$ za pojedine dubine, predlažemo formiranje "krive maksimalnih dozvoljenih opterećenja" kao funkcije $q_a \max$ od B i D . Ova kriva građirana je odgovarajućim vrednostima dubine i sa nje se za dato q_a^* mogu očitati najmanja potrebna dubina ($D_{\min}$), koja se može smatrati optimalnom) i njoj odgovarajuća potrebna širina (B_{opt}).



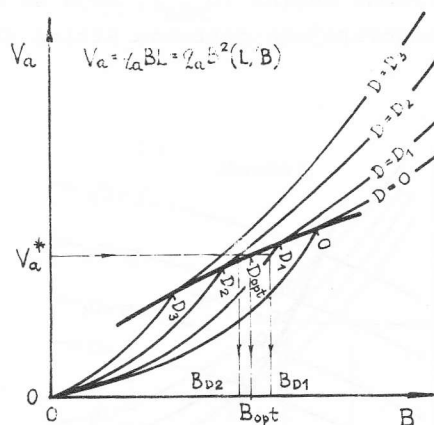
Sl.2. Neophodna dubina ($D_{\min}$) i odgovarajuća potrebna širina (B_{opt}), kao i najmanja potrebna širina (B_{D_2}) stope na dubini $D_2 > D_{\min}$, za dato q_a^*

Za dati kontakti pritisak i dubinu veću od $D_{\min}$ usvojili bismo najmanju vrednost potrebne širine, kako je dato i na Sl.2.

Na osnovu vrednosti dozvoljenog opterećenja (q_a) u pogledu loma tla i sleganja temelja, prikazanih za različite dubine debljim linijama na Sl.2, mogu se prikazati dozvoljene veličine vertikalne komponente rezultante opterećenja tla (V_a) kao na Sl.3, sračunate za dati odnos strana pravougaone stope (L/B). Pošto je sila V_a funkcija kvadrata širine stope, za $q_a = q_a \max$ ne treba očekivati maksimum već samo prelom ove funkcije.

I na Sl.3 se kroz prelomne tačke može formirati kriva maksimalnih dozvoljenih opterećenja i sa nje, za zadatu rezultantu (V_a^*), direktno očitati optimalna dubina i optimalna širina temelja. Za datu dubinu, veću (D_2) ili manju (D_1) od optimalne, potrebna širina (B_{D_2} ili B_{D_1}) očitava se sa postojeće ili inter-

polirane krive, kao na slici.



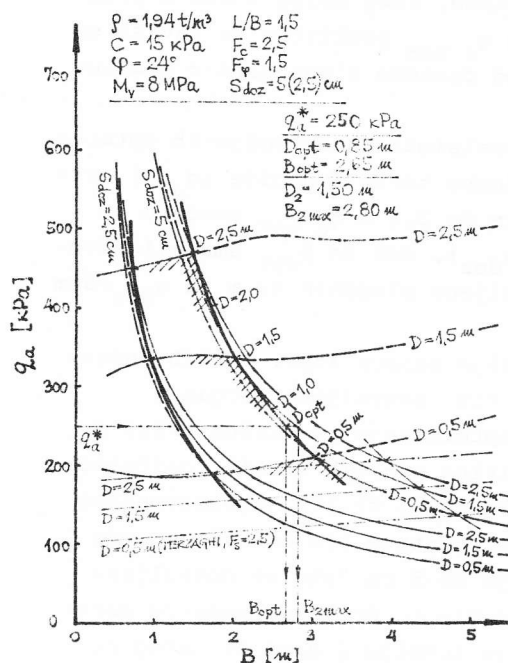
Sl.3. Optimalna širina i dubina (B_{opt}, D_{opt}) stope za koju je $q_a = q_a \max$, kao i potrebne širine (B_{D2}, B_{D1}) na različitim dubinama (D_2, D_1), za datu rezultantu opterećenja (V_a^*)

Postupak prema Sl.3 pogodan je za primenu u praksi, s tim što bi zbog širih potreba trebalo potražiti formu dijagrama sa bezdimenzionalnim veličinama na vertikalnoj ili na obe ose.

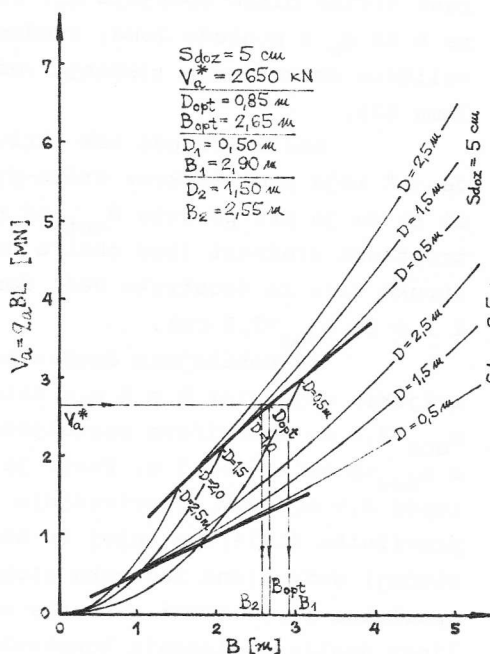
3. PRIMER I ANALIZA REŠENJA TIPIČNOG ZADATKA

Kao ilustracija napred predloženog postupka, sračunati su i prikazani dijagrami dozvoljenog opterećenja u pogledu loma tla i dozvoljenog sleganja za jednostavne uslove - homogeno tlo sa pokazateljima svojstava kao na Sl.4, što odgovara srednje stišljivoj ilovači kakva se najčešće nalazi u površinskoj zoni terena aluvijalnog - koluvijalnog porekla.

Za pet stopa ($B=0,5$ 1,5 2,5 3,5 5,0 m) na tri dubine ($D=0,5$ 1,5 2,5 m) po oba kriterijuma sračunat je dozvoljeni kontakti pritisak (Sl.4) i, na osnovu njega, dozvoljena vertikalna komponenta rezultante (Sl.5).



Sl.4. Odredjivanje $D_{min}=D_{opt}$, B_{opt} i B_{2max} za $D_2 > D_{min}$, za dato q_a^*



Sl.5. Odredjivanje D_{opt} , B_{opt} , B_1 za $D_1 < D_{opt}$ i B_2 za $D_2 > D_{opt}$, za dato V_a^*

Dozvoljeno centrično opterećenje u pogledu loma sračunato je prema jugoslovenskom pravilniku (1974) i prema rešenju Terzaghi-ja za pretpostavku lokalnog loma, sa faktorima sigurnosti kao na Sl.4. Za $D/B > 1$ krive prema pravilniku nešto odstupaju od očekivanog toka zbog nekontinualne promene računskog faktora dubine (d_c).

Dozvoljeno opterećenje u pogledu sleganja sračunato je i prikazano za $s_{doz} = 5$ cm i 2,5 cm, radi procene njegovog uticaja na optimalne i potrebne dimenzije i dubinu temelja.

Dozvoljena rezultanta opterećenja sračunata je preko dozvoljenog specifičnog opterećenja za dati oblik stope (L/B) kao

$$V_a = q_a BL = q_a B^2 (L/B)$$

i prikazana na Sl.5 za oba dozvoljena sleganja.

Kako se vidi, za date uslove na datoj dubini fundiranja (Sl.4), za $B < B_{opt}$ promena širine stope vrlo malo utiče na promenu q_a (<10%) a za $B > B_{opt}$, kada je kriterijum dozvoljeno sleganje, porast širine bitno umanjuje q_a . Pri tome, zbog malog uticaja promene B na q_a u pogledu loma, vrednost $q_{a max}$ praktično ne zavisi od veličine dozvoljenog sleganja već od faktora sigurnosti u pogledu loma tla.

Analizirajući tok "krive maksimalnih dozvoljenih opterećenja" koja prolazi kroz vršne-prelomne tačke funkcija (q_a, B), vidi se da je pri porastu D_{opt} od nule do 2,5 m $q_{a max}$ uvećano na trostruku vrednost (bez obzira na s_{doz}), dok se B_{opt} smanjilo dvostruko više za dvostruko veće dozvoljeno sleganje (2 m za $s_{doz} = 5$ cm i 1 m za $s_{doz} = 2,5$ cm).

Za uobičajenu dubinu temelja samaca (npr. lakših industrijskih objekata) $D = 1$ m, u datom tlu, dozvoljeno sleganje $s_{doz} = 2,5$ cm ograničava dozvoljeno opterećenje za širine $B > 1,3$ m a $s_{doz} = 5$ cm za $B > 2,5$ m. Pošto je širina ovakvih temelja najčešće ispod 2,5 m, ovim se potvrđuje procena iz čl.107 jugoslovenskog pravilnika (1974) po kojoj su na koherentnom tlu (kakav je ovde slučaj) dozvoljena računska sleganja do 5 cm "ako se dozvoljena apsolutna i relativna računska sleganja ne dokazuju posebno detaljnom analizom sleganja konstrukcije temelja i građevinskog objekta". Za proračun nosivosti prema Terzaghi-ju, sleganje $s_{doz} = 5$ cm je kriterijum dozvoljenog opterećenja tek za $B > 4$ m, što se za samce ne primenjuje.

Za dati kontaktni pritisak (q_a^*) dobija se približno konstantna veličina neophodne dubine (D_{opt}) bez obzira na s_{doz} , a optimalna širina je za dvostruko veće s_{doz} takodje dvostruko veća (približno).

Za datu rezultantu opterećenja kao na Sl.5 ($V_a^*=2655$ kN) pri porastu dubine sa 0,5 na 2,5 m (za 2 m tj. za 400%) potrebna širina smanjena je sa 2,9 na 2,4 m (za 0,5 m ili svega 17%).

Za uobičajenu dubinu 1,0 m. dozvoljeni kontaktni pritisak je praktično konstantan i nezavisan od dozvoljenog sleganja a dozvoljena rezultanta ($V_{a\ max}$) za $s_{doz} = 5$ cm veća je skoro 4 puta od rezultante za dva puta manje sleganje $s_{doz} = 2,5$ cm.

Kako se vidi na Sl.5, za dubine $D > 0,5$ m dozvoljena rezultanta je približno linearna funkcija širine temelja a optimalne širine su u području 0,7-1,7 m za $s_{doz} = 2,5$ cm i 1,5 - 3 m za $s_{doz} = 5$ cm tj. dvostruko su veće za dvostruko veće sleganje, kako je konstatovano i sa Sl.4.

4. Z A K L J U Č A K

Predloženim postupkom određuje se konvencionalnim metodama proračuna dozvoljeno opterećenje temeljnog tla, čija vrednost istovremeno zadovoljava zadate uslove stabilnosti tla (faktor(e) sigurnosti u pogledu loma tla) i zadate uslove deformacija tla i objekta (dozvoljeno sleganje temelja).

Dozvoljeno opterećenje iskazano je kao dozvoljeni računski jednako-podeljeni kontaktni pritisak (q_a) ili dozvoljena vertikalna komponenta rezultante opterećenja tla (V_a), uzevši u obzir i uticaj ekcentriciteta (momenta) rezultante, za dati geomehanički profil terena. Ovakvo opterećenje prikazuje se grafički, kao na Sl.2 i 3, za usvojeni odnos dimenzija stope (L/B), kao funkcija širine (B) i dubine (D) stope.

Dijagrami omogućavaju za konstruktersku praksu vrlo pogodno direktno očitavanje "optimalnih" dimenzija i dubine stope ili "potrebnih" dimenzija na usvojenoj dubini, za dato opterećenje q_a ili V_a . Za "optimalne" dimenzije na datoj dubini ostvaren je najveći dozvoljeni kontaktni pritisak ($q_{a\ max}$) koji u datom profilu zadovoljava zadate kriterijume u pogledu loma tla i sleganja. "Potrebne" dimenzije stope odgovaraju kontaktnom pritisku manjem od q_{max} za datu dubinu.

Za primenu postupka potreban je (ne i neophodan) skroman hardver. Softver čini nekoliko povezanih, jednostavnih programa (za proračun opterećenja loma, geoloških i dodatih napona, sleganja) koje nije teško napraviti, čiji listinzi se poslednjih godina publikuju i u literaturi (za sada stranoj) ili koji se mogu nabaviti od više ponudjača (domaćih i stranih). Za grafičku prezentaciju sračunatih funkcija može se koristiti bilo koji odgovarajući program opteg tipa. U tom slučaju, variranjem nekoliko vrednosti L/B dobija se nekoliko odgovarajućih dijagrama čime se može smatrati da je zadatak rešen za opšti slučaj u datom tlu.

Dati postupak za izbor optimalne geometrije temelja može se širiti uvođenjem u proračun i drugih ili složenijih uticaja pa i tehno-ekonomskih kriterijuma. Predloženi dijagrami omogućavaju praćenje toka funkcija i analizu pojedinih uticaja, čime se može doći do eventualne racionalizacije proračuna za određene uslove i dr., kako se vidi i iz izloženog primera sa analizom rešenja tipičnog zadatka.

Opravdanost primene izloženog postupka zavisiće, naravno, od sastava i sklopa terena i pouzdanosti pokazatelja tla kao i od vrste i veličine objekta.

U vezi sa analiziranim dozvoljenim opterećenjem u pogledu loma i sleganja, jedna od načelnih procena odnosi se na konstataciju iz uvodne tačke rada, da štetne deformacije objekata češće nastaju zbog (prekoračenog dozvoljenog) sleganja a redje zbog narušavanja stabilnosti (loma) tla. Ako je to tačno, prema Sl.1 proizilazi da se u praksi češće usvajaju temelji širine $B > B_{opt}$ sa kontaktnim pritiskom $q_a > q_{a \max}$ za datu dubinu.

Pošto se faktor sigurnosti u pogledu loma pod konstantnim q_a neznatno menja sa promenom širine (Sl.4), kada se za takve temelje sleganje posebno ne analizira, procenjuje se za objekat povoljnijim da se za isto q_a usvoji manja širina stope - što će odgovarati nešto manjem faktoru sigurnosti u pogledu loma tla ali će razlika između primenjene i dozvoljene veličine q_a biti manja.

Odredjivanjem dozvoljenog opterećenja tla i primenom postupka dimenzionisanja stope temelja kako je predloženo u ovom radu - potrebe za ovakvim procenama praktično prestaju.

B I B L I O G R A F I J A

- Bažant, Z. (1979) - Methods of foundation engineering, Elsevier, Amsterdam, str. 156.
- Bjerrum, L. (1963) - "Interaction between structure and soils", Proc. ECSMFE, Wiesbaden, 2, str. 135-137.
- De Beer, E.E. (1987) . "Bearing capacity", Chap. 16 u Grund engineer's reference book (editor Bell, F.G.), Butterwoths, London, str. 16/20.
- * * * DIN 1054 Beiblatt (1976) u DIN Taschenbuch 36, Beuth Verlag, Berlin, 1983, str. 37.
- Grant, R., ... (1974) - "Differential settlement of buildings", Journal of the GED, ASCE, 100, GT9, str. 973-991.
- Habib, P. (1983) - An outline of soil and rock mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, str. 64-65.
- Lee, I.K., ... (1983) - Geotechnical engineering, Pitman, Boston, str. 367.
- Philipponnat, G. (1987) - Fondations et ouvrages en terre, Eyrolles, Paris, str. 288-291.
- Pilot, G., Ramli, El (1982) - "Behaviour of shallow foundations" Fondation engineering (editor Pilot, G.), Presses de l'ENPC, Paris, str. 126.
- Polshin, D.E., Tokar, R.A. (1957) - "Maximum allowable non-uniform settlement of structures", Proc. of the 4-th ICSMFE, London, 1, str. 402-406.
- * * * Pravilnik o tehničkim normativima za projektovanje i izvođenje radova kod temeljenja građevinskih objekata (1974), Sl. list SFRJ, br. 34-642/1974.
- Skempton, A.W., Mac Donald, D.H. (1956) - "The allowable settlement of buildings", Proceedings, Institute of civil engineers, Vol. 5, Part III, str. 727-784.
- Szečhy, K., Varga, L. (1978) - Foundation engineering, Akadémiai Kiadó, Budapest, str. 176-180, 482-484.
- Wahls, H.E. (1981) - "Tolerable settlement of buildings", Journal of the GED, ASCE, 107, GT11, str. 1489-1504.

R E Z I M E

Dozvoljeno opterećenje temeljnog tla (q_a) u praksi se određuje odvojeno za usvojeni faktor sigurnosti u pogledu loma tla i (redje) za dozvoljeno sleganje. U radu je izložen način određivanja jedinstvene i najveće vrednosti q_a na bazi oba kriterijuma. Predložena je izrada dijagrama q_a kao funkcije širine i dubine temelja, kao i postupak kojim se određuju neophodna dubina i optimalne dimenzije temelja ili potrebne dimenzije na datoj dubini, za dato opterećenje i oblik stope. Iz analize urađjenog primera vidi se da predloženi postupak, uz poželjno korišćenje skromne savremene računske tehnike, unapređjuje primenu konvencionalnih modela tla i mogućnosti za ocenu pojedinih uticaja u datim uslovima temeljenja.