

PRIMERJAVA METOD ZA STATIČNO ANALIZO TEMELJNIH PLOŠČ

COMPARISON OF METHODS FOR STATIC ANALYSIS OF MAT FOUNDATIONS

dr. Boštjan Pulko, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova 2, Ljubljana
bostjan.pulko@fgg.uni-lj.si

Znanstveni članek

UDK 519.63:624.048:624.073

Povzetek | Račun interakcije med konstrukcijo in temeljnimi tlemi je zaradi specifičnosti gradbenih konstrukcij in kompleksnega obnašanja temeljnih tal zahtevna inženirska naloga. V preteklosti so se interakcijski problemi reševali z izbiro ustreznih računskih postopkov, ki so upoštevali specifičnost konstrukcije in ustrezen matematični model temeljnih tal, ki je kompromis med teoretično sprejemljivostjo in enostavnostjo uporabe v inženirski praksi. Razvoj računalnikov in programske opreme, ki temelji na numeričnih metodah, pa je omogočil, da lahko večino inženirskih problemov, povezanih z interakcijo konstrukcije in temeljnih tal, rešimo natančneje z uporabo nelinearnih elastoplastičnih materialnih modelov. Namen prispevka je pregled metod za izračun temeljnih plošč s poudarkom na v inženirski praksi uveljavljenem Winklerjevem modelu tal, na oceni ustreznosti določitve in rabe modula reakcije tal ter prikaz rezultatov primerjalnih analiz temeljnih plošč po metodi modula reakcije tal (Winklerjev model), po metodi psevdopovezanih vzmeti in po metodi končnih elementov ob upoštevanju nelinearnih mehanskih lastnosti tal. Rezultati kažejo, da je konvencionalni način izračuna temeljnih plošč po metodi modula reakcije nezanesljiv in lahko vodi k neekonomičnim in neustrezno dimenzioniranim temeljnim ploščam. Za projektiranje večjih temeljnih plošč je zato primernejša uporaba 3D-analiz po metodi končnih elementov.

Ključne besede: temeljne plošče, Winklerjev model, modul reakcije tal, metoda končnih elementov

Summary | Due to the specifics of engineering structures and complex behaviour of the ground the analysis of soil-structure interaction remains a complex engineering task. In the past, the soil-structure interaction problems were solved by selecting an appropriate computational method which complied with the type of a structure and an appropriate mathematical model of the ground. The development of computers and computer programs based on numerical methods has enabled many engineering problems related to soil-structure interaction to be solved more accurately by using nonlinear elastic-plastic material models. The purpose of this paper is to show an overview of calculation methods for mat foundations with the emphasis on well-established Winkler ground model, the suitability assessment of the modulus of subgrade reaction and the presentation of the results of comparative mat foundation analyses according to the Winkler method, pseudo-coupled method and 3D numerical analysis using the finite element method by taking into account nonlinear behaviour of the ground. The results show that the conventional methods based on the modulus of subgrade reaction are unreliable and can lead to non-economical and under-dimensioned design. Therefore, for the design of large mat foundations the use of 3D finite element method is preferable.

Keywords: slab foundation, Winkler's model, modulus of subgrade reaction, finite element method

1 • UVOD

Temeljne plošče so zaradi velike površine, ki je v stiku s temeljnimi tlemi, tipičen primer, ko je

pri statičnem izračunu treba upoštevati kompatibilnost posedkov temeljne konstrukcije in

tal (interakcijo). Ključne vrednosti izračuna temeljnih plošč predstavljajo vertikalni premiki (posedki) in notranje sile v temeljni plošči (momenti in prečne sile), ki so v največji meri odvisne od upoštevanega računskega modela tal.

2 • METODE IZRAČUNA TEMELJNIH PLOŠČ

Najpreprostejša metoda izračuna temeljnih plošč je metoda statičnega ravnotežja. Temeljni na predpostavki toge plošče, ki se pod obtežbo premakne kot togo telo brez diferenčnih posedkov. Kontaktni tlaki so neodvisni od togosti temeljne plošče in konstrukcije, njihova razporeditev po temeljni ploskvi pa je glede na ekscentričnost obtežbe linearna ob upoštevanju izključitve področja nateznih napetosti. Izračun kontaktnih tlakov je identičen izračunu napetosti v poljubno ekscentrično obremenjenem prerezu (ploskvi) po principih klasične mehanike. Številne študije ((Poulos in Davis, 1974), (Horvath, 2002)) so pokazale, da izračun po tej metodi ni na varni strani, metoda pa v splošnem ni sprejemljiva, ker ne upošteva deformabilnosti plošč in ne omogoča izračuna realnih posedkov.

Naprednejše metode izračuna temeljnih plošč upoštevajo deformabilnost temeljne plošče in vpliv deformacij na razporeditev kontaktnih napetosti (interakcijo), kar pogojuje izbiro ustreznega matematičnega modela tal, ki definira odnos med kontaktno napetostjo in posedkom tal. Ta odnos je običajno definiran z modulom reakcije tal (MRT) k (kPa/m), ki je definiran kot razmerje med kontaktno obtežbo q in posedkom temeljnih tal w :

$$k = f(q/w) \quad (1)$$

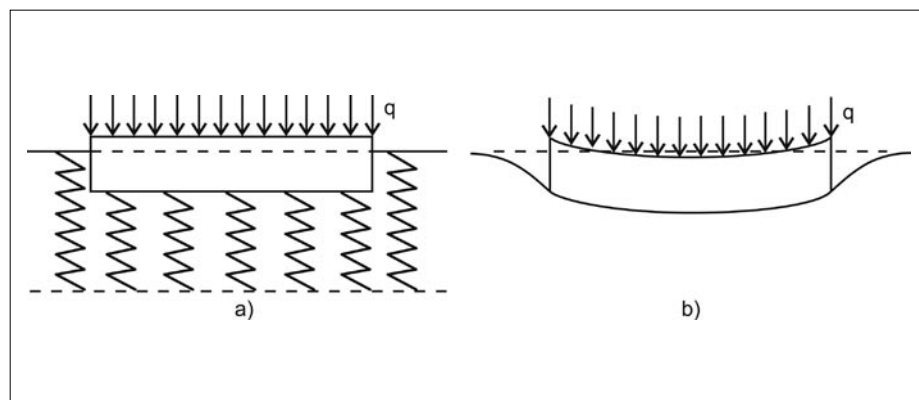
Običajno statični izračun temeljnih plošč opravimo po metodi končnih elementov, kjer plošče modeliramo z linearno-elastičnimi ploskovnimi elementi, ki so v svoji ravnini vertikalno podprti z množico enodimenzionalnih vzmeti. Togost teh vzmeti določata pripadajoča površina temeljne plošče in vrednost modula reakcije tal k , ki je lahko določen na različne načine. Najpreprostejši in v inženirski praksi najpogosteje uporabljan model tal je Winklerjev model (Winkler, 1867), ki upošteva konstantno vrednost MRT oziroma linearen odnos med kontaktnim tlakom in posedkom. Winklerjev model predpostavlja, da je MRT za vse vzmeti enak, da so vzmeti

linearno elastične in da med seboj delujejo neodvisno. Tak model predstavlja poenostavljeno obnašanje tal in ima glede na realno obnašanje tal vrsto pomanjkljivosti ((Horvath, 1983), (Colasanti in Horvath, 2010)):

- konstantna vrednost modula reakcije tal ne more ustrezno opisati nelinearnega odnosa med obtežbo in posedkom tal,
- zvezno in enakomerno obremenjena plošča se, neodvisno od togosti plošče, v izračunu enakomerno posede (ni diferenčnih posedkov) ob enakem skrčku elastičnih vzmeti, kar ni v skladu z dejanskim obnašanjem tal, kjer so posedki tal na robovih manjši od posedkov v središču obtežbe (slika 1),
- predpostavka o neodvisnem delovanju vzmeti ne upošteva strižne odpornosti tal – obtežba tal, ki deluje na enem mestu (točki) povzroči posedke tudi v okolici,
- Winklerjev model je ekvivalenten modelu elastičnih tal končne debeline, kjer so, z izjemo vertikalne napetosti in deformacije, vse druge komponente napetostnega in deformacijskega tenzorja nične,
- realnega obnašanja temeljne konstrukcije in tal ni mogoče modelirati le z eno samo konstantno vrednostjo modula reakcije tal,
- obtežbe, ki delujejo ob objektu, ne vplivajo na posedke objekta.

Izboljšanje Winklerjevega modela predstavljajo metode povezanih vzmeti (angl. coupled methods), kjer vertikalne vzmeti ne delujejo več neodvisno. Večina teh metod (npr. (Reissner, 1967)) pa se v inženirski praksi ni uveljavila zaradi nejasne metodologije za izračun modula reakcije tal povezanih vzmeti (Horvath, 2002).

Poenostavitev metod povezanih vzmeti predstavlja metoda psevdopovezanih vzmeti (angl. pseudo-coupled method), ki, podobno kot Winklerjev model, uporablja neodvisne vzmeti, a z upoštevanjem različnih vrednosti MRT za skupino ali za posamezne vzmeti glede na njihovo lokacijo na temeljni plošči. Modelne in numerične študije so pokazale, da je mogoče dobiti bolj realne rezultate, če v območju robov temeljne plošče upoštevamo približno dvakrat večji modul reakcije tal kot v središču temeljne ploskve ((ACI 336, 1988), (Bowles, 1988)). Alternativo metodam, ki modelirajo tridimenzionalna tla z množico enodimenzionalnih vzmeti, predstavljajo 3D-računske analize po metodi končnih elementov, ki so sposobne hkratne napetostno-deformacijske analize temeljnih tal, temeljne konstrukcije in v najboljšem primeru tudi celotne (nad)konstrukcije. Uporaba teh metod v praksi je zaradi dostopnosti in specifičnosti programske in strojne opreme, potrebe po kakovostnejših geotehničnih podatkih, zahtevnosti ter potrebnega časa in cene izdelave takšnih analiz še vedno omejena na najbolj zahtevne inženirske konstrukcije.



Slika 1 • Deformacijsko obnašanje a) Winklerjevega modela in b) realnih tal

3 • MODUL REAKCIJE TAL (MRT)

V praksi projektni izračuni temeljnih plošč najpogosteje temeljijo na Winklerjevem modelu elastičnih vzmeti ali na metodi psevdopovezanih vzmeti, katerih togost določa modul reakcije tal. Že ime kaže na to, da gre za parameter, ki je v inženirski praksi pogosto napačno razumljen in interpretiran. Vzrok za to je dejstvo, da MRT ne predstavlja osnovne fizikalne lastnosti temeljnih tal oziroma zemljine, saj ga že po definiciji definirata dve količini (kontaktni tlak in posedek), ki sta dejansko že rezultat izračuna temeljne konstrukcije in tal (Colasanti in Horvath, 2010). MRT je zato fizikalni parameter poenostavljenega modela tal, ki je odvisen od temeljnih tal, lastnosti konstrukcije in od obtežbe. Njegovo vrednost določajo predvsem naslednji vplivi:

- vpliv jakosti in razporeditve obtežbe,
- nelinearno obnašanje temeljnih tal,
- vpliv velikosti in oblike temeljne konstrukcije,
- vpliv globine temeljenja,
- vpliv slojevitosti temeljnih tal in drugih sprememb tal z globino,
- vpliv togosti (nad)konstrukcije.

Zaradi nelinearnega obnašanja tal in neupoštevanja povezanosti vzmeti se MRT po temeljni ploskvi spreminja. V primeru, ko je MRT za neko temeljno konstrukcijo podan enolično – z eno samo vrednostjo, moramo vrednost MRT razumeti le kot razmerje med povprečno kontaktno napetostjo na temeljni ploskvi in pričakovanim povprečnim posedkom temeljne konstrukcije, pri čemer vrednost MRT predstavlja veliko poenostavitev napetostno-deformacijskega obnašanja tal.

3.1 Ocena vrednosti modula reakcije tal

Metod za oceno vrednosti modula reakcije tal je več. Če so temeljna tla homogena, je modul mogoče oceniti na osnovi rezultatov obremenilne preizkušnje tal s togo kvadratno ali krožno ploščo ob upoštevanju ustreznih korekcij zaradi razlik v širini, obliki in vplivni globini preizkusne in dejanske temeljne plošče. Terzaghi (1955) je podal korekcijske faktorje glede na tip tal, širino in dimenzije temeljne plošče, ki prevedejo modul k_p , določen s kvadratno ploščo dimenzij $0,305 \times 0,305$ m, na vrednost modula reakcije tal za temeljno ploščo širine B v obliki:

$$k = k_p \left(\frac{B + 0,305}{2B} \right)^2 \quad \text{in} \quad k = k_p \frac{0,305}{B} \quad (2)$$

za nekoherentna in koherentna tla, kjer je B širina temeljne plošče. Za plošče na koherentnih tleh je treba upoštevati še korekcijo zaradi dolžine plošče L , če velja $L > B$:

$$k_{B \times L} = \frac{2k}{3} \left(1 + \frac{B}{L} \right) \quad (3)$$

Sowers (1977) je predlagal podobno korekcijo v obliki:

$$k = k_p \left(\frac{B_p}{B} \right)^n \quad (4)$$

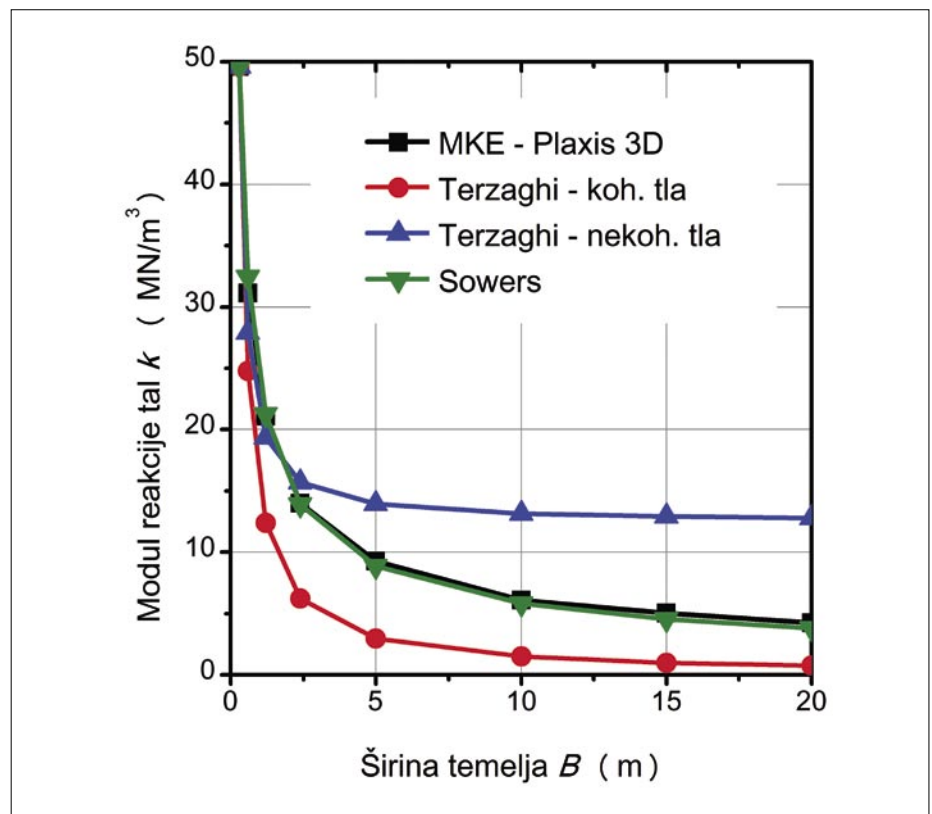
B_p je širina testne plošče, parameter n pa znaša med 0,5 in 0,7. Ker je uporaba teh korekcij možna le v primeru homogenih temeljnih tal z debelino, ki presega nekajkratno širino temeljne ploskve, je uporabnost teh metod v praksi omejena.

Za analizo vpliva dimenzij temeljne ploskve na vrednost modula reakcije tal smo opravili primerjalno 3D-numerično analizo enakomerno obremenjene kvadratne toge temeljne

Materialni parameter	Enota	Vrednost
Prostorninska teža γ	(kN/m ³)	20
Modul E_{50}^{ref}	(MPa)	40
Modul E_{oed}^{ref}	(MPa)	40
Modul E_{ur}^{ref}	(MPa)	120
Ref. tlak p^{ref}	(kPa)	50
Faktor m	–	0,5
Poissonovo število ν_{ur}	–	0,2
Kohezija c'	(kPa)	1,0
Strižni kot ϕ'	(°)	38

Preglednica 1 • Materialne lastnosti temeljnih tal (model Hardening-soil)

plošče po metodi končnih elementov. Izračun smo opravili ob upoštevanju dvojne simetrije in variiranju dolžine stranice plošče med $B=0,3$ in 20 m. Obtežba plošče je znašala 100 kPa, dimenzije računskega modela tal pa je pogojevala velikost plošče; upoštevana globina temeljnih tal je znašala $5B$, dolžina stranice računskega modela pa $2,5B$ po shemi na sliki 4.



Slika 2 • Primerjava izračunanih in napovedanih vrednosti MRT

Izračun po metodi končnih elementov smo opravili s komercialnim programom Plaxis 3D (Brinkgreve s sodelavci, 2011), za modeliranje tal pa uporabili model Hardening-soil, ki spada v skupino elastoplastičnih modelov z izotropnim utrjevanjem. Opis materialnega modela, ki je primeren za nekoherente zemljine, je na voljo v literaturi (Schanz s sodelavci, 1999), upoštevane fizikalne lastnosti temeljnih tal pa so prikazane v preglednici 1.

Na sliki 2 so prikazane vrednosti MRT, ki izhajajo iz numerične analize po MKE (Plaxis 3D), kot jih definira razmerje med računsko obtežbo plošče $q = 100$ kPa in izračunanim posedkom toge plošče in ocenjene vrednosti

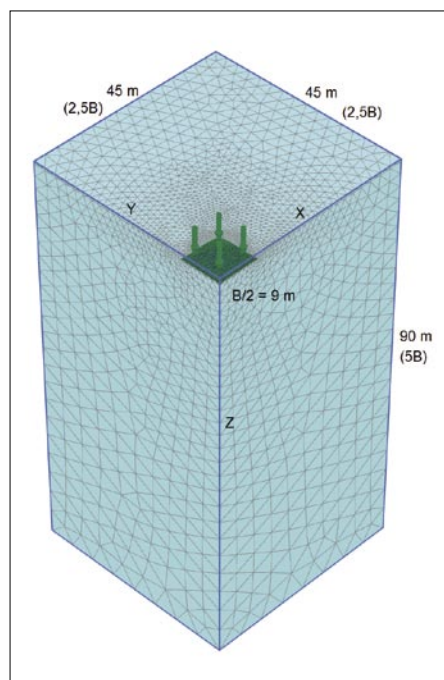
po enačbah Terzaghija in Sowersa, če za izhodiščno vrednost k_b upoštevamo izračunano vrednost modula reakcije tal za testno ploščo dimenzij $0,3 \times 0,3$ m. Napoved vrednosti MRT po Terzaghiju (1955) je pogojno sprejemljiva, če dimenzije temeljne plošče ne presežejo trikratne širine testne plošče. Korekcija po Sowersu (1977) pa z računsko določeno vrednostjo parametra $0,5 \leq n = 0,611 \leq 0,7$ kaže na razmeroma dobro ujemanje med izračunanimi vrednostmi in vrednostmi MRT, napovedanimi na osnovi »preiskave« s testno ploščo. Ne glede na dobro ujemanje je ocena modula reakcije tal iz preiskave s testnimi ploščami v splošnem možna le v homogenih tleh ustrezne debeline

(vsaj trikratna širina plošče). V nasprotnem primeru je vpliv modelnega faktorja prevelik, napoved vrednosti MRT pa nezanesljiva.

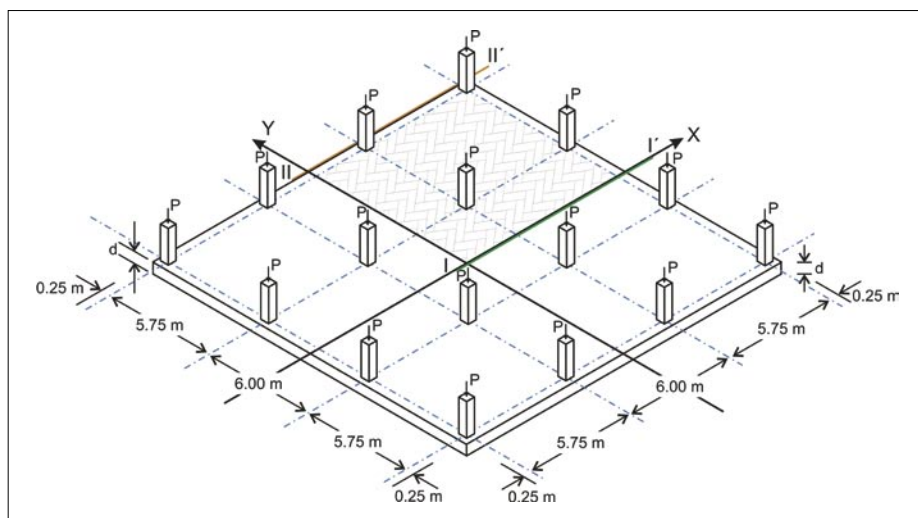
Bolj splošen in v inženirski praksi običajnejši način določitve MRT temelji na elastičnih parametrih zemljin oziroma tal (modula elastičnosti E in Poissonovega števila ν), ki jih je mogoče določiti z laboratorijskimi in terenskimi raziskavami. S klasičnimi postopki se najprej izračuna posedek tal pod povprečno obtežbo temeljne konstrukcije in nato določi vrednost modula reakcije tal. Alternativno je možna tudi določitve modula reakcije tal z empiričnimi postopki za izračun posedkov na osnovi terenskih preiskav.

4 • PRIMERJALNE RAČUNSKÉ ANALIZE TEMELJNE PLOŠČE

Za ponazoritev vpliva računske metode na izračunane posedke, upogibne momente v temeljni plošči in kontaktne tlake smo opravili primerjalne analize različno debelih kvadratnih armiranobetonskih temeljnih plošč po metodi končnih elementov s programom Plaxis 3D, Winklerjevi metodi ob upoštevanju konstantne vrednosti modula reakcije tal in po metodi psevdopovezanih vzmeti s programom SAP2000 (CSI, 1995).



Slika 4 • Računski model – mreža končnih elementov (Plaxis 3D)



Slika 3 • Računska shema temeljne plošče z oznako prečnih profilov I-I' in II-II'

4.1 Podatki

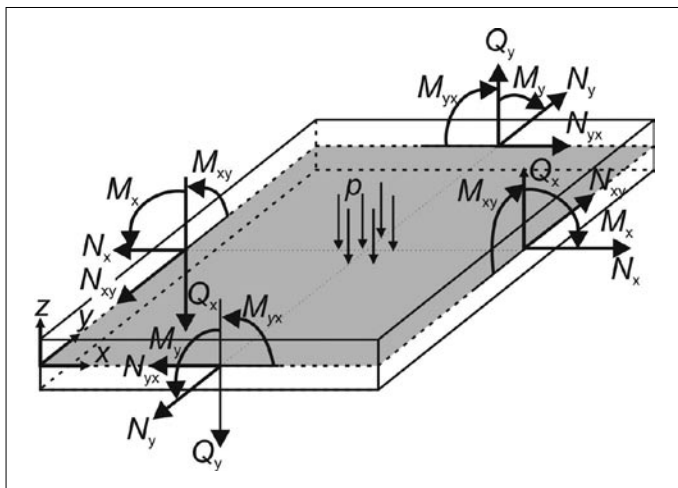
V izračunih smo upoštevali elastično temeljno ploščo florisnih dimenzij 18×18 m ($E_b = 30$ GPa, $\nu_b = 0,15$) s spremenljivo debelino plošče $d = 40, 80$ in 120 cm. Ploščice so zaradi primerljivosti rezultatov obremenjene z enakomerno obtežbo $q = 50$ kPa in s 16 točkovnimi silami $P = 1000$ kN, ki delujejo v rastru 6 m in ploščo obremenjujejo preko kontaktne ploskve $0,5 \times 0,5$ m. Računska shema temeljne plošče z obtežbo je prikazana na sliki 3. Ekvivalentna (povprečna) vertikalna obtežba na celoten floris plošče znaša $q = 99,38$ kPa. Izračun po MKE s programom Plaxis 3D smo opravili ob upoštevanju dvoosne simetrije konstrukcije in obtežbe. Za modeliranje temeljnih tal smo uporabili model Hardening Soil z ma-

terialnimi podatki, ki so navedeni v preglednici 1. Računski model z mrežo končnih elementov je prikazan na sliki 4, oznake notranjih sil v temeljni plošči pa na sliki 5.

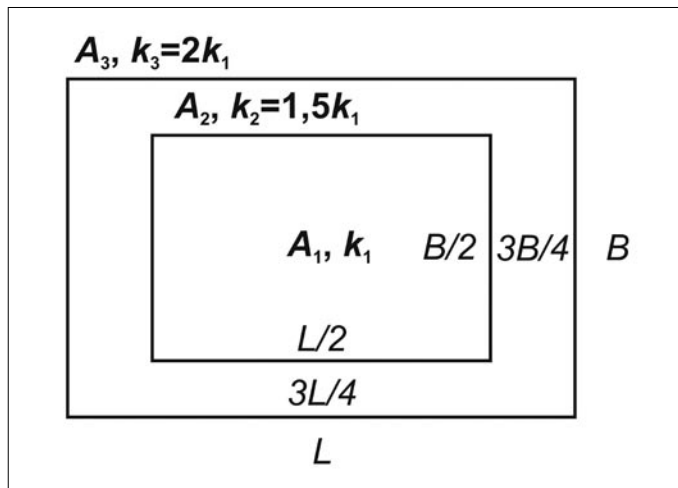
Povprečno vrednost MRT $k = 4350$ kPa/m za izračun po Winklerjevem modelu smo določili iz rezultatov izračunov po MKE kot razmerje med povprečno ekvivalentno obtežbo plošče q in povprečnim posedkom analiziranih plošč \bar{w} :

$$\bar{w} = \frac{\bar{w}_{40} + \bar{w}_{80} + \bar{w}_{120}}{3} \quad (5)$$

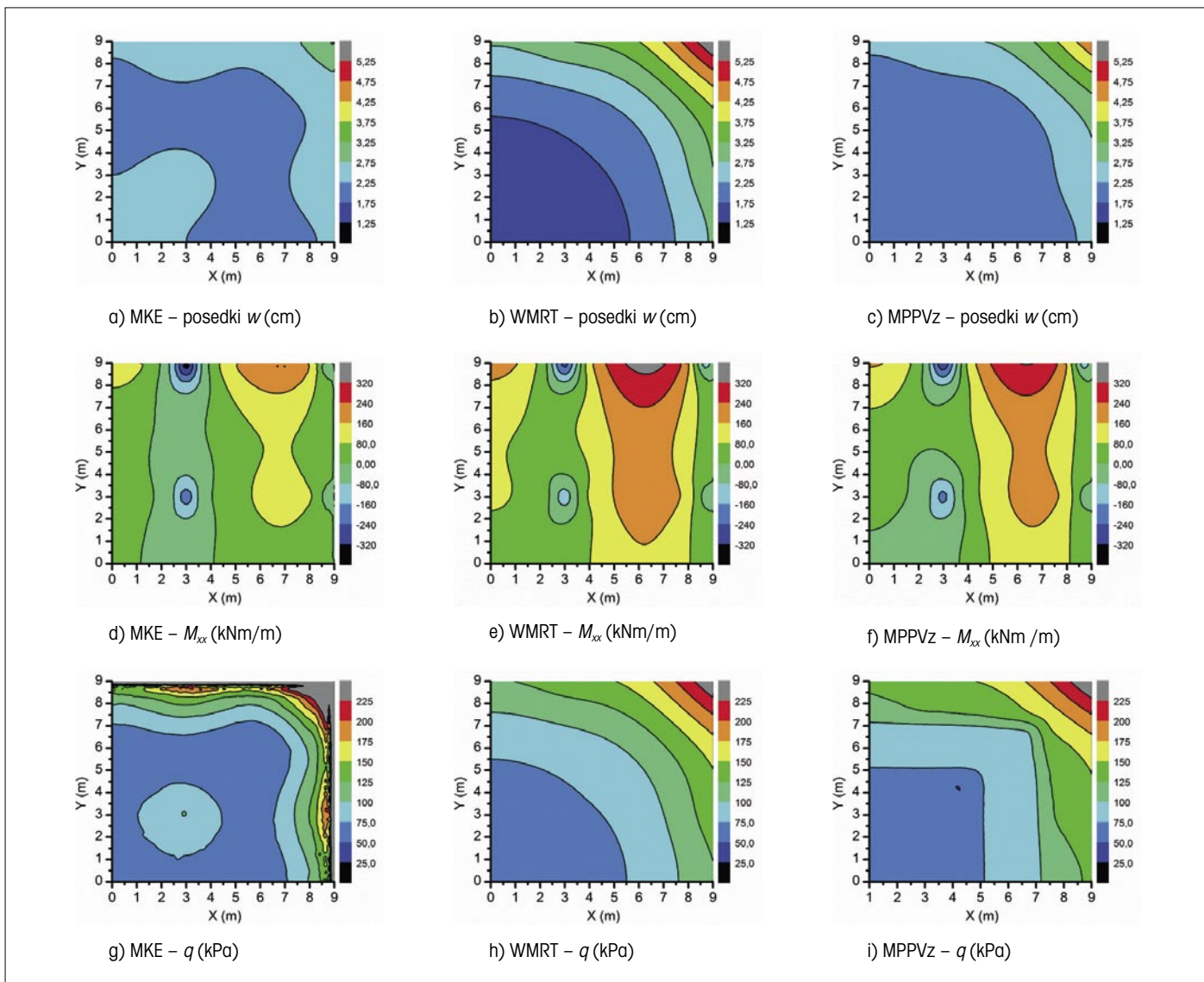
Vrednosti \bar{w}_{40} , \bar{w}_{80} in \bar{w}_{120} so povprečni posedki različno debelih plošč ob upoštevanju razporeditve posedkov na kontaktni ploskvi.



Slika 5 • Oznake notranjih sil v temeljni plošči



Slika 6 • Razporeditev MRT po priporočilih ACI 366 (1988)



Slika 7 • Primerjava posedkov, upogibnih momentov in kontaktnih napetosti za AB-ploščo debeline 40 cm

Izračun temeljne plošče po Winklerjevi metodi ob upoštevanju konstante vrednosti modula reakcije tal smo opravili s programom SAP2000 ob upoštevanju elastičnega podprtja plošč. Alternativno smo z istim programom opravili še izračun po metodi psevdopovezanih vzmeti (ACI 336, 1988), ki temelji na predpostavki, da je MRT na obodu plošče dvakrat večji in v vmesnem delu 1,5-krat večji kot v sredini plošče, po shemi, prikazani na sliki 6. Vrednost modula reakcije tal v osrednjem delu plošče k_1 izračunamo ob upoštevanju ekvivalentnosti po enačbi:

$$k_1 = \frac{k A}{A_1 + 1,5A_1 + 2,0A_1} = 2714 \frac{kPa}{m} \quad (6)$$

4.2 Rezultati računskih analiz

Na diagramih na sliki 7 so za prvi kvadrant plošče debeline 40 cm prikazane izolinije posedkov w , upogibnih momentov M_{xx} (vrednosti M_{yy} so simetrične) in kontaktnih tlakov q , izračunanih po metodi končnih elementov s programom Plaxis 3D (oznaka MKE), po Winklerjevem modelu s konstantno vrednostjo MRT (oznaka WMRT) in po alternativni metodi psevdopovezanih vzmeti (oznaka MPPVz). Vrednost posedkov v osrednjem delu temeljne plošče je podobna ne glede na način izračuna, razporeditev posedkov v smeri proti vogalom temeljne plošče pa se bistveno razlikuje. Izračun po metodi modula reakcije tal (WMRT) izkazuje največje diferenčne posejke, izračun po MKE s programom Plaxis 3D pa najmanjše. Posledično se to na podoben način odraža v

velikosti in razporeditvi upogibnih momentov. Izračun s programom Plaxis 3D izkazuje koncentracijo kontaktnih napetosti neposredno v območju delovanja koncentriranih sil in ob robovih plošče, kar ob manjših posedkih plošče na robu kaže na drugačno razporeditev modula reakcije tal, kot jo sicer predpostavimo v izračunih po metodi WMRT in MPPVz.

4.3 Vpliv togosti plošče

Za presojo vpliva togosti temeljne plošče na posejke in upogibne momente smo računske analize opravili še za plošči debeline 80 in 120 cm. Primerjavi minimalnih in maksimalnih vrednosti posedkov in upogibnih momentov sta prikazani v preglednicah 2 in 3, diagrami upogibnih momentov M_{xx} v prečnih prerezih I-I' in II-II' pa na sliki 8.

Debelina plošče (cm)	Posedek	MKE	WMRT	MPPVz	indeks WMRT/MKE	indeks MPPVz/MKE
40	w_{min} (cm)	2,14	1,34	1,93	0,63	0,90
	w_{max} (cm)	3,29	5,78	4,65	1,76	1,41
80	w_{min} (cm)	2,19	1,75	2,07	0,80	0,95
	w_{max} (cm)	2,66	3,48	2,95	1,31	1,11
120	w_{min} (cm)	2,21	2,07	2,20	0,94	1,00
	w_{max} (cm)	2,47	2,76	2,54	1,12	1,03

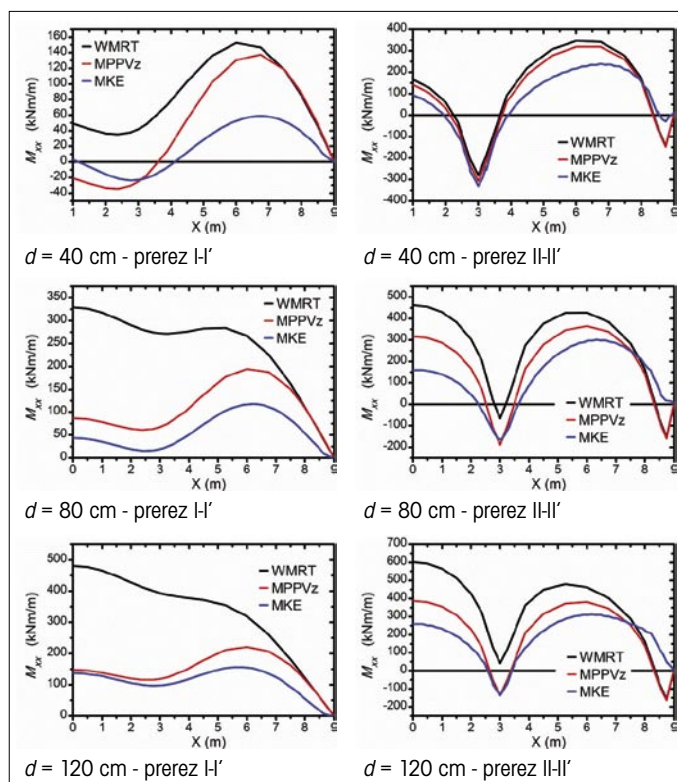
Preglednica 2 • Primerjava minimalnih in maksimalnih vrednosti posedkov

Debelina plošče (cm)	Moment M_{xx}	MKE	WMRT	MPPVz	indeks WMRT/MKE	indeks MPPVz/MKE
40	M_{min} (kNm/m)	-334	-281	-308	0,84	0,92
	M_{max} (kNm/m)	247	346	319	1,40	1,29
80	M_{min} (kNm/m)	-256	-154	-189	0,60	0,74
	M_{max} (kNm/m)	308	463	364	1,50	1,18
120	M_{min} (kNm/m)	-173	-157	-164	0,91	0,95
	M_{max} (kNm/m)	322	602	387	1,87	1,20

Preglednica 3 • Primerjava minimalnih in maksimalnih upogibnih momentov M_{xx}

Iz rezultatov je razvidno, da povečanje togosti plošče ne glede na tip izračuna ugodno vpliva na zmanjšanje diferenčnih posedkov, pri čemer osnovna oblika deformiranja (konvekсна, če se vogali posejajo bolj kot centralni del in konkavna v nasprotnem primeru) ostane nespremenjena. Iz preglednice 3 in diagramov upogibnih momentov na sliki 8 je razvidno, da se momenti ob povečanju togosti plošče

povečajo v smeri natezne površine plošče, kot jo določa osnovna oblika deformiranja. S povečanjem debeline plošče s 40 na 120 cm pri izračunu WMRT se vrednost maksimalnega pozitivnega upogibnega momenta glede na izračun po MKE poveča z indeksa 1,40 na indeks 1,87, razlika med negativnima maksimalnima momentoma pa se začne manjšati (indeks 0,84 → 0,91). Vrednosti momentov,



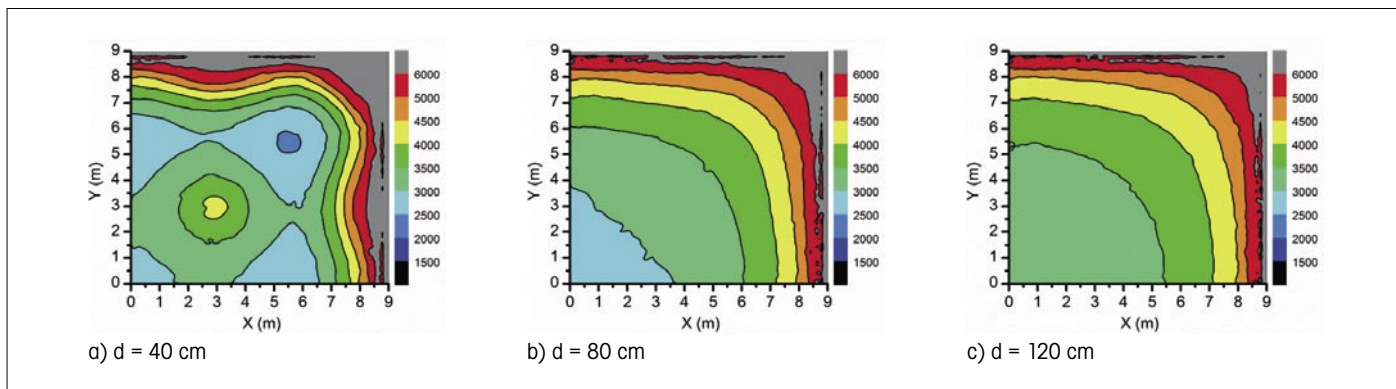
Slika 8 • Upogibni momenti M_{xx} v ploščah debeline 40, 80 in 120 cm v prečnih prerezih I-I' in II-II'

izračunane po metodi MPPVz, so bližje vrednostim izračuna po MKE, maksimalne razlike (od 26 % do 29 %) pa manj odvisne od togosti plošče, pri čemer so vrednosti negativnega maksimalnega upogibnega momenta, podobno kot pri izračunu WMRT, večje (po absolutni vrednosti manjše) od izračuna po MKE in v kontekstu dimenzioniranja plošč na nevarni (nekonservativni) strani.

Na sliki 9 je prikazana razporeditev modula reakcije tal za plošči debeline 40 in 120 cm, ki ju dobimo z analizo po MKE s programom Plaxis 3D. Vrednosti MRT zelo odstopajo od vrednosti, predpostavljjenih v konvencionalnih

izračunih (WMRT, MPPVz). Opazimo lahko, kako je razporeditev MRT po plošči odvisna od togosti plošče. S povečanjem togosti plošče je opazen trend povečevanja MRT od sredine proti robovom plošče, kar se sklada

s predpostavko metode pseudopovezanih vzmeti, ki daje glede na rezultate izračuna s programom Plaxis 3D tudi bolj primerljive vrednosti premikov in upogibnih momentov (preglednici 2 in 3).



Slika 9 • Razporeditev modula reakcije tal k (kPa/m) – izračun po MKE za plošče debeline 40, 80 in 120 cm

Izračunana razporeditev MRT je popolnoma drugačna od predpostavljene razporeditve po metodi Winklerja (konstantna vrednost modula reakcije tal), ki izkazuje največje diferenčne posedke. Kljub temu pa za konvencionalni izračun WMRT ne moremo smatrati, da je na varni strani. Iz rezultatov (preglednica 3 in slika 9) je razvidno, da so v

ploščah pozitivni in negativni momenti, vrednosti izračunov s konstantno vrednostjo MRT pa niso konservativne (večje od teoretično pravilnejših vrednosti) za momente obeh predznakov. Podobno lahko ugotovimo, da izračun po Winklerjevi metodi s konstantno vrednostjo modula reakcije tal (WMRT) ne vodi k ekonomični temeljni konstrukciji. Pro-

jektant bi se, v želji po zmanjšanju diferenčnih posedkov, verjetno odločil za debelejšo (bolj togo) ploščo, ki bi bila, glede na izračune po MKE in MPPVz, pretežno predimenzionirana (v konkretnem primeru pozitivni momenti), v manjši meri pa celo neustrezno dimenzionirana (v konkretnem primeru negativni momenti).

5 • SKLEP

Kljub napredku tehnologije in metod se v inženirski praksi še vedno uporabljajo preprosti modeli tal, kot je Winklerjev model, ki predstavlja skrajno poenostavitev odnosa med kontaktnimi napetostmi in pripadajočimi posedki. Opravljena študija potrjuje izsledke drugih raziskovalcev, da izračun temeljnih plošč po metodi modula reakcije tal v splošnem ne omogoča zanesljive ocene upogibnih momentov in posedkov ter lahko vodi k neustreznim in neekonomičnim rešitvam (Horvath, 2002). Rezultate in zanesljivost izračuna je mogoče izboljšati z metodo pseudopovezanih vzmeti, ki s primerno razporeditvijo modula reakcije tal po temeljni plošči delno odpravi eno izmed bistvenih pomanjkljivosti Winklerjevega modela (neupoštevanje strižne odpornosti temeljnih tal). Omeniti velja, da za metodo pseudopovezanih vzmeti obstajajo različna priporočila za razporeditev modula reakcije tal (ACI 366, 1988), pri čemer gre za empirične poenostavitve, ki pa niso nujno zanesljive in

splošno veljavne za poljubno obliko in togost temeljne plošče ter razporeditev in velikost obtežbe. Da so vrednosti in razporeditev modula reakcije tal v splošnem pogojene z lastnostmi tal, temeljno konstrukcijo in obtežbo, pa kažejo tudi rezultati 3D-numeričnih analiz, kjer že sprememba debeline plošče pomembno vpliva na vrednost in razporeditev modula reakcije tal po temeljni plošči.

Kljub očitkom, da je uporaba Winklerjevega modela pomanjkljiva, nezanesljiva in neekonomična, ne moremo mimo dejstva, da izkušnje v praksi tega ne kažejo. Vzrok za to je zagotovo, da so temeljne konstrukcije le redko izpostavljene maksimalnim računsko upoštevanim obremenitvam, v uporabi ustreznih varnostnih faktorjev in v vplivu nadkonstrukcije, ki s svojo togostjo običajno pozitivno vpliva na zmanjšanje diferenčnih posedkov temeljnih plošč. Če izključno iz izkustvenega vidika Winklerjev model ocenimo kot ustrezen, pa ne moremo mimo ugotovitve, da takšen

izračun običajno ne vodi k ekonomičnim rešitvam. Upoštevati pa velja, da izračuni, ki temeljijo na modulu reakcije tal, niso primerni za analize temeljnih plošč na nehomogenih tleh, kjer se lahko lastnosti tal po površini plošče bistveno spreminjajo, in v primerih, kjer se moduli reakcije tal časovno spreminjajo zaradi konsolidacijskih procesov v temeljnih tleh.

Alternativo skoraj 150 let staremu konceptu (Winkler, 1867), ki se je zaradi svoje enostavne uporabe trdno zasediral v inženirski praksi, danes predstavljajo 2D-, v primeru temeljnih plošč pa 3D-numerične analize po metodi končnih elementov, ki pa morajo biti opravljene ob upoštevanju ustreznih materialnih modelov za tla in geološko-geomehanskih podatkov. Z inženirskega stališča je zagotovo največja ovira za kakovosten preskok pri obravnavi problemov, povezanih z interakcijo konstrukcije in temeljnih tal, zahtevnost numeričnih analiz, ki so v veliki meri pogojene s programsko opremo, ki je prilagojena bodisi računanju konstrukcij (stavb, mostov, ipd.) ali pa obravnavi geomehanskih problemov.

6 • LITERATURA

- ACI Committee 336, Suggested analysis and design procedures for combined footings and mats. ACI structural journal, American concrete institute, Detroit, Mich., USA, vol. 85, No.2, pp 304–324, 1988.
- Bowles, J. E., Foundation analysis and design. McGraw-Hill Book Company. New York, N.Y., USA, 4th edition, 1004 p., 1988.
- Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., Swolfs, W. M., Plaxis 3D 2011, Plaxis bv, Netherlands, 2011.
- Colasanti, R. J., Horvath, J. S., Practical subgrade model for improved soil-structure interaction analysis: software implementation, Practice periodical on structural design and construction, ASCE, vol. 15, No. 4, pp. 241–300, 2010.
- Horvath, J. S., Modulus of subgrade reaction: new perspective, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 109(12): 1591–1596, 1983.
- Horvath, J. S., Subgrade models for soil-structure interaction analysis, Foundation engineering: Current principles and practices, ASCE, New York, N.Y., USA, pp. 599–612, 1989.
- Horvath, J. S., Soil-structure interaction research project – basic SSI concepts and applications overview, Report No. CGT-2002-2, Manhattan College, School of engineering, New York, USA, (www.engineering.manhatan.edu/civilCGT.html), 2002.
- Poulos, H. G., Davis, E. H., Elastic solutions for soil and rock mechanics, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., USA, 397 p., 1974.
- Reissner, E., A note on deflection of plates on a viscoelastic foundation, Journal of applied mechanics, Vol. 25/Transactions of the American society of mechanical engineers, Vol. 80, pp. 88–91, 1967.
- SAP 2000, integrated finite element analysis and design of structures, Computers and Structures Inc., Berkeley, ZDA, verzija 12, 1995.
- Schanz, T., Vermeer, P. A., Bonnier, P. G., The hardening-soil model: formulation and verification, In R. B. J. Brinkgreve, Beyond 2000 in computational geotechnics, Balkema, Rotterdam, pp. 281–290, 1999.
- Sowers, G. F., Foundation modulus for a mat on sand, Preprint No. 29371, American society of civil engineers, New York, 1977.
- Terzaghi, K., Evaluation of coefficients of subgrade reaction, Geotechnique, Vol. 5, No. 4, Dec., 1955, pp. 297–326, 1955.
- Winkler, E., Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit (on elasticity and fixity), H. Dominicus, Prague, 1867.