

Mojca RAVNIKAR TURK
univ.dipl.inž.grad., Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana

Janko LOGAR
doc.dr., univ.dipl.inž.grad., Univerza v Ljubljani, FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

GEOTEHNIČNO OPAZOVANJE POSTAVITEV MEJNIH VREDNOSTI

POVZETEK: Z geotehničnim opazovanjem običajno ugotavljamo skladnost dejanskega obnašanja objekta s projektnimi predpostavkami in tako posredno ugotavljamo varnost izvedene konstrukcije. Poznati moramo verjetne mehanizme porušitve ter kritične elemente ter vzpostaviti opazovanje na ključnih mestih. Za ugotavljanje varnosti objekta je potrebno poznati tudi pričakovane vrednosti parametrov, ki jih merimo, prav tako pa moramo že vnaprej določiti tudi mejne vrednosti. Določanju mejnih vrednosti pa projektanti objektov in izvajalci opazovanja posvečamo premalo pozornosti, kar zmanjšuje pomen rezultatov meritev.

V prispevku so opisana načela določanja merskih mest in obsega opazovanja. Podanih je tudi nekaj napotkov za prikazovanja in analizo rezultatov meritev. Na preprostem primeru sidrane pilotne stene je prikazan eden od možnih načinov določitve pričakovanih in mejnih vrednosti za deformacije in sidrne sile. Namen prispevka je poudariti potrebo po določanju mejnih vrednosti za opazovane parametre že v fazi projektiranja.

GUIDELINES FOR GEOTECHNICAL MONITORING – DETERMINATION OF THE LIMIT VALUES

SUMMARY: Geotechnical monitoring is mainly used for the verification of the conformity of the actual behavior of geotechnical structures with the design predictions. In such a way the safety of the structure is indirectly assessed. It is important to know in advance the possible failure mechanisms and critical sections of the geotechnical structure, and to position the monitoring instrumentation accordingly. Moreover, the anticipated values of the quantities to be measured have to be known, and limits of acceptable behavior have to be set in advance for each individual monitored quantity. In designs the limit values of these monitored quantities are rarely stated, which makes the use of geotechnical monitoring less efficient.

The paper presents the principles which can be used to select measuring points and the extent of monitoring. Some guidelines for the presentation of results and their analysis are given. A way is shown in which, for a typical piled wall, the limit values of displacements and anchor forces can be assessed. The paper emphasizes the need for the determination of such limit values in the design report.

UVOD

Opazovanje geotehničnih objektov se v Sloveniji izvaja že vrsto let predvsem z namenom, da se preverja varnost objektov. S 'Pravilnikom o temeljenju' (Ur. list SFRJ, 1990) je bilo predvideno opazovanje posedanja objektov v določenih primerih (če so računski posedki večji od 5cm, pri objektih temeljenih na izboljšanih tleh, pri močnejšem nihanju nivoja podtalnice...). Druge vrste meritev s pravilnikom o temeljenju niso bile posebej zahtevane.

Z gradnjo geološko in morfološko zahtevnejših odsekov avtocestnega križa Slovenije, se je geotehnično opazovanje začelo pogosto uporabljati predvsem za preverjanje stabilnosti večjih ukopov ter nasipov na slabše nosilnih tleh. Tako smo pridobili veliko izkušenj in hkrati spoznali, da je potrebno kvaliteto teh del izboljšati. Opazovanje objektov lahko delimo na:

- tehnično opazovanje pred in med gradnjo (zato da preverimo računsko prognozo z dejanskim obnašanjem objekta),
- tehnično opazovanje v celotni življenjski dobi objekta (vrednotenje stanja konstrukcije, planiranje vzdrževalnih del, ugotavljanje dodatne varnosti).

Dolgoročni cilj geotehničnega opazovanja je, da se pridobijo zanesljivi podatki o obnašanju konstrukcij. Zaželeno je, da se za opazovane konstrukcije izvede povratna analiza ter se pridobi izkušnje, ki lahko izboljšajo bodoče projektne rešitve. Tako zmanjšamo negotovost pri določanju varnosti in povečujemo naše znanje o geotehničnih konstrukcijah. Kot je zapisano v Eurocode 7 je potrebno podatke o dejanskem obnašanju konstrukcij zbirati, da se pridobijo baze podatkov, ki se upoštevajo pri primerljivih primerih.

DOLOČITEV OBSEGA OPAZOVANJA

Že v fazi geološko-geomehanskih raziskav je potrebno oceniti zahtevnost lokacije v smislu stabilnostnih, erozijskih, ekoloških, zunanjih vplivov in drugih dejavnikov. Ugotoviti je potrebno, kateri dejavniki bodo bistveno vplivali na gradnjo. Zlasti v primerih, ko pričakujemo, da se bodo dejavniki spreminjali (nivo talne vode, plazenje...), je potrebno vzpostaviti opazovanje že več let pred pričetkom projektiranja oziroma gradnje. Opazovati je potrebno velikosti vplivov (amplitude in hitrost sprememb).

V fazi projektiranja je potrebno predvideti mehanizme, ki bistveno vplivajo na obnašanje konstrukcije. Na primer: pri slabo prepustnih, nasičenih, malo nosilnih tleh je stabilnostno najmanj ugodno stanje takoj po obremenitvi tal. Pri zemeljskih pregradah obstaja nevarnost počasnega izpiranja drobnih delcev, ki z leti slabša stabilnostne razmere. Pri podpornih konstrukcijah so pomembne spremembe v neposredni okolici (hidrostatski pritisk, obtežba prometa, novogradnje).

Ko so poznani geološko-geotehnični pogoji in mehanizem porušitve, se oceni, ali je opazovanje sploh potrebno. Če je potrebno, se v projektu določi glavni cilj opazovanja (kontrola nosilnosti, deformacij tal ali posameznih nosilnih elementov in drugo). Na podlagi računskih modelov v statičnih izračunih se določijo kritična mesta in pričakovane vrednosti ključnih parametrov (deformacije, sidrne sile) na teh mestih. Nato se projektant, geomehanik in strokovnjak za opazovanje dogovorijo o obsegu opazovanja (parametrih, ki se bodo opazovali), o potrebni pogostosti ter natančnosti dobljenih rezultatov. Šele nato se določi način meritev, lokacije merskih mest in merilna oprema.

Glede na potrebno pogostost oziroma način zbiranja podatkov ločimo tri vrste meritev:

- Ročne meritve (terenski zapisi), v določenih časovnih intervalih. Primerne so za ugotavljanje počasnih sprememb.
- Polavtomatske (off-line), občasno se izvajajo kontinuirane meritve, podatki so periodično zberejo in analizirajo. Primerne so za ugotavljanje kratkotrajnih, izjemnih obtežb.
- Avtomatsko (on-line), stalne kontinuirane meritve za ključne parametre, ki se v realnem času prenašajo v center obveščanja. Nujno, kjer je potrebna stalna kontrola.

Že pred pričetkom meritev je potrebno s premislekom določiti tudi možne dodatne ukrepe. Če bodo meritve pokazale, da so le-ti potrebni, je potrebno imeti že vnaprej določen program del.

Ključnega pomena pri izbiri vrste opreme je njena zanesljivost. Glede na pogostost opazovanj pa se izbere vrsta opreme in način zbiranja rezultatov meritev. Ročne meritve so primerne, če se izvajajo le občasno. Meritve, ki se izvajajo stalno (med gradnjo in v celotni življenjski dobi), pa je iz ekonomskega vidika in vidika pridobivanja kvalitetnih podatkov smiselno avtomatizirati. Sistem lahko omogoča stalne meritve in občasen prenos podatkov (ročno ali prek modema) ali pa prenos podatkov v center obveščanja v realnem času. Taka avtomatizacija je potrebna pri opazovanju aktivnih plazov, visokih pregrad ter drugih objektov visoke pomembnosti ali tveganja, kjer je potrebno takojšnje alarmiranje in obveščanje.

Skupaj z meritvami je potrebno beležiti tudi vse druge faktorje, ki lahko vplivajo na meritve. To so odstopanja od projekta, dinamika gradnje (globina izkopov, višina objekta...), vremenski vplivi (temperatura, padavine, osončenje), zunanji dejavniki (dinamične obtežbe)... Zapis o terenskih meritvah morajo vsebovati tudi podatek o izvajalcu meritve.

Kot je predvideno z vpeljanimi sistemi kakovosti, se dela izvajajo po standardih ali navodilih. Dela mora izvajati ustrezno izobražen kader po verificiranih postopkih, ki so ponovljivi in kjer je znana merilna negotovost. Merilna oprema mora biti kalibrirana in vzdrževana, vzdrževati (in poškodovana nadomestiti) je potrebno tudi merska mesta.

Za vgradnjo merilne opreme je potrebno izdelati tehnološki elaborat. Vgradnjo posameznega kosa opreme se opiše po posameznih korakih in se navede tudi vso potrebno opremo za vgrajevanje. Izdelati je potrebno poročilo o vzpostavljenem sistemu opazovanja. Poročilo vsebuje tako osnovne podatke o lokacijah, kakor tudi podrobne podatke o vgrajeni opremi in seznam potrebnih vzdrževalnih del.

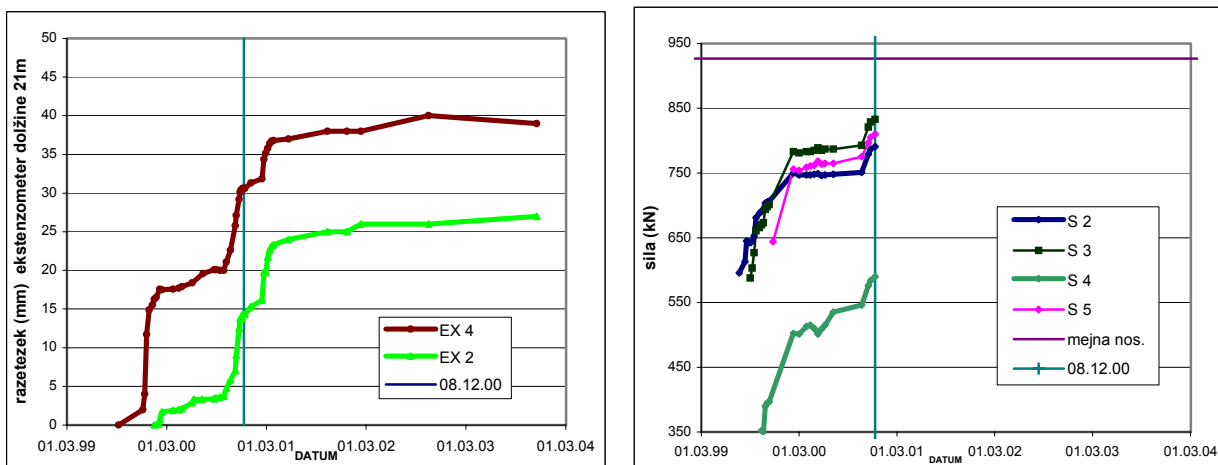
Vzpostavitev in izvajanje tehničnega opazovanja ni majhen finančni zalogaj, zato je potrebno skrbno izbrati vrste meritev ter merilno opremo, kar je delo strokovnjakov za to področje. Finančna sredstva se lažje zagotavljajo med gradnjo, saj predstavljajo le majhen delež investicije. V projektih vzdrževanja objektov se predpiše potrebni obseg opazovanja v času uporabe objekta, da se v tem sklopu predvidijo tudi finančna sredstva.

ANALIZA REZULTATOV MERITEV

Vse rezultate meritev je potrebno analizirati, saj v nasprotnem primeru izvajanje meritev ni smiselno. Ta analiza je iz več razlogov zahtevna. Možno je, da so nekateri rezultati netočni (pokvarjena oprema, človeški faktor, višja sila), zato je potrebno primerjati rezultate različnih meritev, da se izlušči verodostojne podatke. Načeloma mora biti sistem opazovanja takšen, da omogoča preverjanje izmerjenih količin. Na sliki 1 sta prikazana dva časovna diagrama. Na prvem so prikazani prirastki deformacij v ekstenzometrih (v mm). Na drugi je prikazano naraščanje sil (v kN) v istem časovnem obdobju. Na tem diagramu je prikazana tudi vrednost mejne nosilnosti sider. Z vertikalno črto pa je na obeh diagramih poudarjen datum zadnjega podatka o sidrskih silah.

Pri analizi moramo vse rezultate meritev interpretirati hkrati. Upoštevati je potrebno vse dejavnike (vodostaj, dinamika gradnje...) in izmerjene rezultate meritev smiselno pojasniti. Če jih ne moremo smiselno pojasniti, je nekje napaka ali pa je mehanizem obnašanja konstrukcije drugačen od predvidenega. Ko izključimo napako meritev, izvedemo druge raziskave, kalibriramo izbrani model...

Dobljene podatke lažje interpretiramo, če so pregledno prikazani. Pomagajo grafične oblike prikaza (npr. časovni diagrami, na katerih je prikazana dinamika gradnje). Če je več grafičnih prilog, ki prikazujejo parametre, ki bi morali biti istega velikostnega reda, naj bodo tudi diagrami v enakem merilu. Smiselno je izdelovati korelacije (npr. piezometrični nivo – padavine - pretok).



Slika 1. Korelacija med raztezki ekstenzometrov in prirastki sidrnih sil.

RAZVOJ NA PODROČJU TEHNIČNEGA OPAZOVANJA

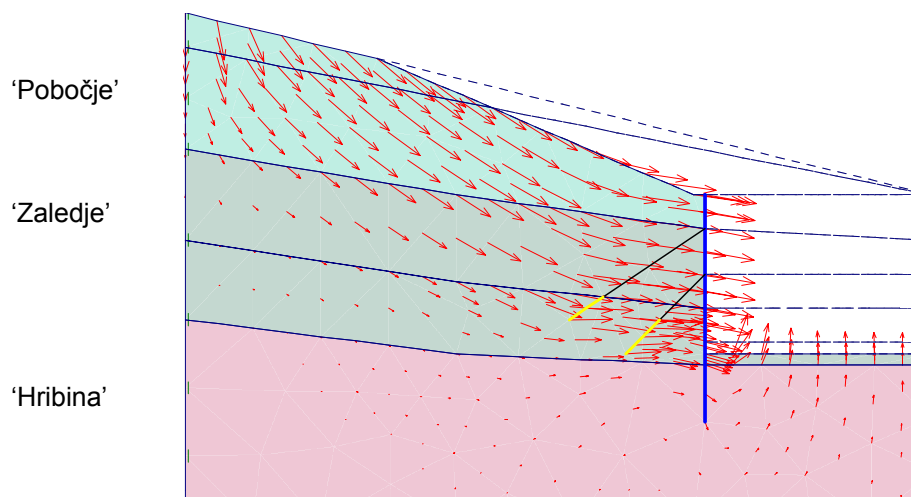
Z napredkom tehnologije se je predvsem uveljavila avtomatizacija meritev s stalnim beleženjem in obveščanjem v realnem času. Meritve se v časovnih intervalih, ki so odvisni od amplitude sprememb, beležijo v pomnilnik. Preko operaterja brezžične telefonije se prenašajo v center obveščanja. Na podlagi pričakovanih in mejnih vrednosti, se vzpostavi sistem obveščanja in alarmiranja. Z razvojem ekspertnih sistemov, nevronske mreže bo možno računske modele sproti kalibrirati.

Geotehnični objekti so izvedeni v naravno danih okoliščinah. Geologije, kakor tudi karakteristik zemljin običajno ne moremo spremeniti. Zato je vsaka geotehnična konstrukcija edinstvena, saj je obremenjena z le njej lastnimi vplivi. Modelne preiskave geotehničnih konstrukcij se izvaja le redko, zato so prav na tem področju toliko bolj pomembni primeri iz prakse – dejansko obnašanje objektov v danih geotehničnih pogojih. Obstaja pobuda na evropskem nivoju, da se vzpostavijo take baze podatkov.

DOLOČITEV MEJNIH VREDNOSTI

Na dejansko obnašanje konstrukcije vpliva mnogo dejavnikov, ki jih ovrednotimo skladno s predpisi in po inženirski presoji. Projektni izračuni temeljijo na vhodnih podatkih (privzetih na podlagi dokumentacije, ki je v dani fazi projektiranja na razpolago), izvajajo pa se v karakterističnih prerezih. Tudi če imamo na razpolago natančne geodetske podloge, temeljite geološko-geomehanske in hidrološke raziskave, je zemljina še vedno plastovita, heterogena in anizotropna. Če dodamo spremenljive vremenske razmere ter človeški faktor, je obnašanje izvedene konstrukcije vedno drugačno od projektiranega.

Na primeru dvakrat sidrne pilotne stene, izvedene za varovanje brežine, smo prikazali enega izmed možnih načinov določanja mejnih vrednosti. Računsko smo izvednotili deformacije in notranje količine za tri primere. Primer A je projektni izračun, pri primerih B in C pa smo upoštevali odstopanja od projektnih vhodnih podatkov. Prerez sidrane stene je prikazan na sliki 2. Izbrali smo tri vrste zemljin 'Hribina', 'Zaledje' in 'Pobočje'. Račun je izveden po metodi končnih elementov (PLAXIS), 'Hardening soil' materiali model, drenirano stanje. Stena debeline 60cm je visoka 20m, vpeta 5m v 'Hribino' ter 2m v 'Zaledje'. Za njo je 'Pobočje' z naravnim naklonom 14° oziroma 11° . Po izkopu je naklon 'Pobočja' strmejši in sicer 24° . V dveh etažah (I. etaža 3m in II. etaža 6m pod krono stene) je stena sidrana s prednapetimi geotehničnimi sidri (štiri-vrvna), razporejenimi na medosni razdalji 2m, talne vodi ni. Stena se izvaja v šestih fazah (izkop, sidranje I. etaže, izkop 2, sidranje II. etaže, izkop do dna v dveh fazah) ter pri primeru A še poglobitev za en meter.



Slika 2. Prerez sidrane pilotne stene (primer A s poglobitvijo izkopa za 1m)

Vhodni podatki za posamezne izračune (materialne karakteristike c' (kPa), ϕ' (°), E_{ref} (kPa) ter sila prednapetja) so prikazani v preglednici 1. Karakteristike hribine so za vse tri račune enake. V drugem delu preglednice 1 so podani rezultati izračuna za zadnjo fazo gradnje, ko je izveden celotni izkop (sile v sidrih, največji upogibni moment, horizontalni pomik glave sidra II. etaže ter računska varnost celotne konstrukcije). Pri primeru A so prikazane tudi vrednosti za stanje brez poglobitve (projektne vrednosti).

A – dejanske mat. karakteristike so enake projektnim, vendar se izkop izvede 1m globlje kot po projektu

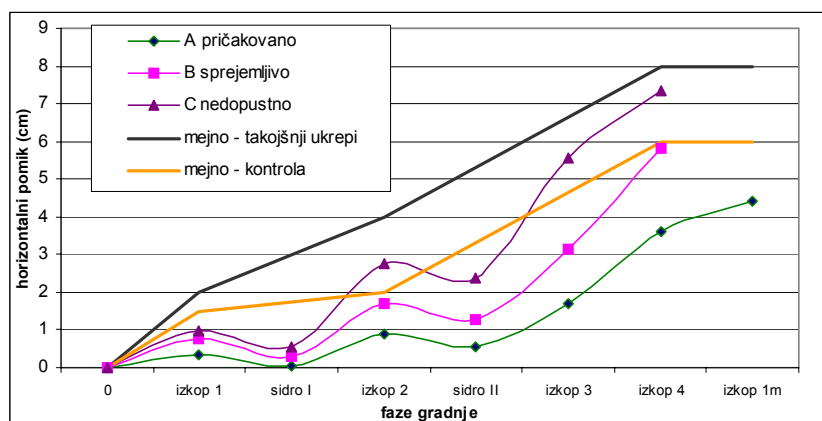
B – dejanske materialne karakteristike zemljin (c , ϕ ; E_{ref}) so slabše, vendar je naklon zaledja manjši

C – materialne karakteristike 'Zaledje' (ϕ , E_{ref}) so še slabše, sidri sta prednapeti na manjšo silo

Preglednica 1. Računski vhodni podatki in rezultati

Računski primer / vhodni podatki (rezultati)	A			B			C		
	ϕ	c	E_{ref}	ϕ	c	E_{ref}	ϕ	c	E_{ref}
Zemljina									
Pobočje	27°	10	10.000	25°	1	8.000	25°	1	8.000
Zaledje	30°	10	14.000	26°	1	10.000	25°	1	9.000
Hribina	36°	20	80.000	36°	20	80.000	36°	20	80.000
Naklon zaledja	14° (24°)			11° (24°)			14° (24°)		
Izkop	1m globlji (0m)			0m globlji			0m globlji		
P_o v I. in II. etaži (kN)	400		400	400		400	350		350
Rezultati	A			B			C		
sila v sidru I. etaže (kPa)	548 (541)			539			548		
sila v sidru II. etaže (kPa)	613 (583)			603			658		
M_{max} (kNm)	707 (543)			778			1000		
Ux_{max} (cm)	4,4 (3,6)			5,8			7,3		
varnost F	1,65 (1,75)			1,35			1,25		

Za vsak računski primer (A, B, C) je na sliki 3 prikazan horizontalni pomik sidrišča v II. etaži glede na fazo gradnje (faza gradnje/horizontalni pomik). Pomiki zaradi izkopa do kote vrha pilotne stene niso upoštevani. Pričakovano obnašanje konstrukcije (deformacije) opisuje krivulja označena z 'A'. Če imamo vzpostavljeno opazovanje (vertikalni inklinometer do dna stene ter mersko celico sidrnih sil), lahko primerjamo skladnost dejanskega obnašanja konstrukcije z računskimi predpostavkami (primer A). Z vidika varnosti je sprejemljivo tudi obnašanje konstrukcije, kot ga opisuje krivulja B. Potrebno pa je izvesti kontrolo z vidika trajnosti in uporabnosti konstrukcije ter preverjati stanje tudi po gradnji. Mejno pa je obnašanje konstrukcije kot ga opisuje krivulja C. V tem primeru so nujni dodatni ukrepi za povečanje varnosti. Izračunane deformacije in napetosti so odvisne tudi od izbranega materialnega modela zemljin.



Slika 3. Horizontalni pomik sidrišča v II. etaži glede na fazo gradnje

Dejstvo je, da je napovedovanje deformacij geotehničnih objektov nehvaležno delo. Obnašanje konstrukcije bo gotovo drugačno od računskega, saj karakteristik tal ne moremo predpisati. Kljub temu pa morajo biti že v projektu določene meje še sprejemljivega obnašanja konstrukcije, ki se ob upoštevanju novih podatkov seveda lahko spremenijo.

ZAKLJUČEK

Geotehnično opazovanje se v zadnjih letih uporablja vse pogosteje in vse bolj sistematično. Postalo je jasno, da v slovenskih heterogenih geoloških pogojih s še tako skrbnimi raziskavami v razumnem obsegu ni mogoče dovolj zanesljivo napovedati obnašanja zahtevnih konstrukcij. Šele opazovanje odziva konstrukcije med gradnjo nedvoumno pove ali je konstrukcija v danih pogojih varna, to je ali se obnaša skladno s projektnimi predpostavkami.

Da bi lahko geotehnična opazovanja kar najbolje uporabljali, pa morajo veljati naslednja izhodišča:

- s projektnimi analizami morajo biti določene meje še sprejemljivega obnašanja konstrukcije z vrednostmi, ki jih na terenu lahko zanesljivo merimo,
- projekt geotehničnega opazovanja mora biti zastavljen celovito (vse vrste meritev v enem projektu),
- s projektom geotehničnega opazovanja mora biti določeno:
 - vrste meritev
 - zahtevana natančnost in frekvenca meritev
 - lokacije in število merskih mest
 - detajli vgradnje merskih mest (naprav)
 - način poročanja o rezultatih meritev
- rezultate vseh meritev je potrebno interpretirati hkrati,
- predvidena mora biti zamenjava morebiti poškodovanih merskih mest,
- zagotovljen mora biti pravočasen pretok podatkov med izvajalcem geotehničnega opazovanja, izvajalcem del, projektantom in naročnikom.

Nedvomno bo v prihodnosti vse bolj pogosta uporaba metod geotehničnega opazovanja. Da bi postala ta dejavnost bolj razumljiva, bo potrebno avtomatizirati načine prikazovanja in analiziranja rezultatov tako, da bodo rezultati pregledni in lahko razumljivi ter dostopni v realnem času. Razmisliti bo potrebno tudi o racionalnosti ročnih meritev v primerjavi z avtomatiziranimi meritvami. Prednost slednjih je predvsem:

- reden zajem podatkov
- neodvisnost od operaterja in manjša možnost napak
- dostopnost rezultatov vsem pooblaščenim v realnem času
- nižja cena v celotni dobi uporabe (višja je le cena začetne investicije).