





# Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN

TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH

INŽENIRJEV INŽENIRSKO ZBORNICE SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; ISSN 0017-2774

Ljubljana, december 2007, letnik 56, str. 305-340

Izdajatelj:

**Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS)**, Leskoškova 9e, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200; faks 01 52 40 199 v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS)**, ob podpori **Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani** in **Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**  
izr. **prof. dr. Matjaž Mikoš**  
**Jakob Presečnik**

MSG IZS: **Gorazd Humar**

**mag. Črtomir Remec**

**doc. dr. Branko Zadnik**

FGG Ljubljana: **doc. dr. Marijan Žura**

FG Maribor: **Milan Kuhta**

ZAG: **prof. dr. Miha Tomaževič**

Glavni in odgovorni urednik:

**prof. dr. Janez Duhovnik**

Sodelavec pri MSG IZS:

**Jan Kristjan Juteršek**

Lektorica:

**Alenka Raič Blažič**

Lektorica angleških povzetkov:

**Darja Okorn**

Tajnica:

**Anka Holobar**

Oblikovalska zasnova:

**Mateja Goršič**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

**Kočevski tisk**

Naklada:

**3000 izvodov**

Podatki o objavah v reviji so navedeni v bibliografskih bazah COBISS in ICONDA (The Int. Construction Database) ter na

<http://www.zveza-dgits.si>

Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 22,95 EUR; za študente in upokojene 9,18 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 169,79 EUR za en izvod revije; za naročnike iz tujine 80,00 EUR. V ceni je všteti DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:

SI56 0201 7001 5398 955

## Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

- Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
- Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
- Besedilo prispevkov mora biti napisano v slovenščini.
- Besedilo mora biti izpisano z znaki velikosti 12 pik z dvojnimi presledki med vrsticami.
- Prispevki morajo imeti naslov, imena in priimke avtorjev ter besedilo prispevka.
- Besedilo člankov mora obvezno imeti: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); oznako ali je članek strokoven ali znanstven; nazive, imena in priimke avtorjev ter njihove naslove; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; naslov SUMMARY, in povzetek v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ..., naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so dodatki označeni še z A, B, C, itn.
- Poglavlja in razdelki so lahko oštevilčeni.
- Slike, preglednice in fotografije morajo biti omenjene v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino. Vse slike in fotografije v elektronski obliki (slike v običajnih vektorskih grafičnih formatih, fotografije v formatih .tif ali .jpg visoke ločljivosti) morajo biti v posebnih datotekah, običajne fotografije pa priložene.
- Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
- Kot decimalno ločilo je treba uporabiti vejico.
- Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki: (priimek prvega avtorja, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja morajo biti označena še z oznakami a, b, c, itn.
- V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela opisana z naslednjimi podatki: priimek, ime prvega avtorja (lahko okrajšano), priimki in imena drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
- Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
- Prispevke je treba poslati glavnemu in odgovornemu uredniku prof. dr. Janezu Duhovniku na naslov: FGG, Jamova 2, 1000 LJUBLJANA oz. [janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si](mailto:janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si). V spremnem dopisu mora avtor članka napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren. Prispevke je treba poslati v enem izvodu na papirju in v elektronski obliki v formatu MS WORD in v 8. točki določenih grafičnih formatih.

Uredništvo

# Vsebina • Contents

Srečno 2008

stran 306

**Novoletno voščilo predsednika ZDGITS**

Miro Vrbeč, univ. dipl. inž. grad.

## Članki • Papers

stran 307

izr. prof. dr. Vojko Kilar, univ. dipl. inž. grad.

David Koren, univ. dipl. inž. grad.

**POTRESNA IZOLACIJA STAVB KOT ALTERNATIVA ZA GRADNJO NA  
POTRESNIH OBMOČJIH**

SEISMIC ISOLATION OF BUILDINGS AS AN ALTERNATIVE FOR BUILDING IN  
EARTHQUAKE PRONE AREAS



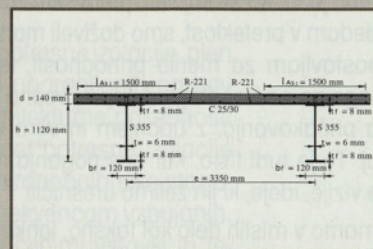
stran 319

doc. dr. Uroš Klanšek, univ. dipl. gosp. inž.

red. prof. dr. Stojan Kravanja, univ. dipl. inž. grad.

**STROŠKOVNO OPTIMIRANJE SOVPREŽNIH KONSTRUKCIJ IZ BETONA IN  
JEKLA – 1. DEL: ANALIZA LASTNIH IZDELAVNIH STROŠKOV**

COST OPTIMIZATION OF THE CONCRETE-STEEL COMPOSITE STRUCTURES  
– PART 1: SELF-MANUFACTURING COST ANALYSIS



stran 333

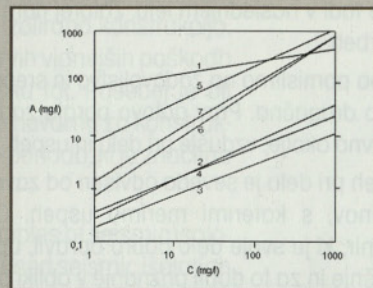
dr. Darko Drev, univ. dipl. inž. kem.

red. prof. dr. Peter Bukovec, univ. dipl. inž. kem.

izr. prof. dr. Jože Panjan, univ. dipl. inž. grad.

**PROCESI ČIŠČENJA TEHNOLOŠKIH ODPADNIH VODA Z NARAVNIMI  
IONSKIMI IZMENJEVALCI**

PROCESSES OF CLEANING OF TECHNOLOGICAL WASTEWATER WITH  
NATURAL IONIC EXCHANGERS



## Vsebina letnika 56/2007

stran 339

### Seminarji

PRIPRAVLJALNI SEMINARJI IN IZPITNI ROKI  
ZA STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2008

### Koledar prireditev

J. K. Juteršek, univ. dipl. inž. grad.

Slika na naslovnici: Viadukt Dobruša na gorenjski avtocesti, foto Janez Duhovnik

## NOVOLETNO VOŠČILO PREDSEDNIKA ZDGITS

### Spoštovane kolegice in kolegi!



Kot se vrta kolo, se obrne tudi leto. Smo na koncu starega in začetku novega leta. Imam čast, da vam v teh prijetnih dneh napišem nekaj besed spodbude in vam zaželim zdravja in sreče v novem letu 2008.

Običaji praznovanja novega leta se porajajo iz preteklosti. Osnovni motiv je rojstvo novega in v želji vseh tudi boljšega. Kot se prerodi narava, naj bi tudi v novem letu

nastal boljši jutri. Ljudje upajo in verujejo v to, upanje pa, kot veste, umre zadnje.

Kaj to pomeni za nas tehnike in inženirje, kaj je to boljši jutri? Ali je to dovolj dela, so to večji uspehi, uspešni projekti ali je to še kaj več? Verjetno je lahko še kaj več, predvsem zadovoljstvo in sreča pri delu. Če gledam v preteklost, smo doživeli marsikatero izkušnje, vendar jih ne postavljam za merilo prihodnosti, temveč bolj kot izkušnjo in podlago za naprej. Pogled naprej vedno zre v novo, novo doživetje, nova pričakovanja, z upanjem in vero v nekaj več, kot je bilo do sedaj. To je tudi tisto, kar nas poganja naprej; pomembno je imeti nove vizije, ideje, ki jih želimo uresničiti.

Če imamo v mislih delo kot takšno, lahko zatrdim, da ga je dovolj za vse, ki želijo delati. V gradbeništvu je trenutno dovolj dela in tako kaže tudi v naslednjem letu. Zatorej nam glede dela ni potrebno biti v skrbeh.

Če pa pomislimo na zadovoljstvo in srečo pri delu, pa je lahko stvar malo drugačna. Prav gotovo poraja zadovoljstvo dobro in prijetno delovno okolje, vzdušje pri delu in uspeh.

Uspeh pri delu je seveda odvisen od zavestnega in dobrega dela in načinov, s katerimi merimo uspeh. Osebnostno zadovoljstvo ima inženir, ki je svoje delo dobro opravil, uporabil vse svoje znanje in izkušnje in za to dobil priznanje v obliki plačila za dobro delo. Tu se bom dotaknil predvsem nagrajevanja inženirjev, s katerim nisem zadovoljen. Ocenjujem, da predvsem mladi inženirji niso zadovoljni z nagrajevanjem. Če primerjam stroške življenja in ustvarjanje poklica in statusa inženirja, današnje nagrade predvsem mladim inženirjem ne zadoščajo niti za običajno življenje (družina, stanovanje, avtomobil, izobraževanje in še kaj za priboljšek, da ne govorim o statusu). Prav zaradi mladih bi morali v novem letu prevetriti tudi vprašanje vrednosti inženirskega dela, da bo tudi zadovoljstvo pri delu inženirja večje.

Vsi drugi uspehi pridejo, če si jih le želimo in seveda če kaj storimo za to. Saj poznate star pregovor »Sam si pomagaj in Bog ti bo pomagal«.

Če bo le zdravje in sreča, bomo dosegli vse, kar si bomo zaželeli. To želim vsem vam in vašim najdražjim v letu 2008!

**Miro Vrbek, predsednik ZDGITS**



*Srečno novo leto 2008*

*vsem bralcem, avtorjem, recenzentom,*

*članom Izdajateljskega sveta*

*in drugim sodelavcem*

*Gradbenega vestnika*

*želi*

*Uredništvo*

# POTRESNA IZOLACIJA STAVB KOT ALTERNATIVA ZA GRADNJO NA POTRESNIH OBMOČJIH

## SEISMIC ISOLATION OF BUILDINGS AS AN ALTERNATIVE FOR BUILDING IN EARTHQUAKE PRONE AREAS

izr. prof. dr. Vojko Kilar, univ. dipl. inž. grad.,

vojko.kilar@fa.uni-lj.si

David Koren, univ. dipl. inž. grad.,

david.koren@fa.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo,

Zoisova 12, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 699.841

**Povzetek** | V prvem delu članek prikazuje princip delovanja potresne izolacije, njen zgodovinski razvoj ter osnovne značilnosti danes najpogosteje uporabljenih naprav potresne izolacije v svetu. Na kratko so prikazane tudi glavne arhitekturne posebnosti potresno izoliranih stavb. V drugem delu članka smo učinkovitost potresne izolacije analizirali na primeru idealizirane tipične evropske večetažne armiranobetonske stanovanjsko/poslovne stavbe, izpostavljene različnim intenzitetam in frekvencam vzbujanja. Uporabili smo najenostavnejši sistem elastomernih ležišč s svinčnimi vstavki in temeljno brano. Rezultati nelinearnih analiz za deset izbranih zapisov potresa so prikazani v obliki primerjav največjih pomikov in poškodb za neizolirano in izolirano konstrukcijo. Dobljeni rezultati potrjujejo učinkovitost potresne izolacije, saj do prvih vidnejših poškodb konstrukcije pride šele pri še enkrat večjem projektnem pospešku tal. Posebej je bil analiziran tudi primer, ko lahko vgradnja potresne izolacije postane nevarna za konstrukcijo, do česar lahko pride v primeru vzbujanja z dolgo prevladujočo periodo, ki je značilna za konstrukcije na slabih tleh.

**Summary** | The first part of the paper presents the basic principles of seismic isolation, its historical review and the basic characteristics of nowadays used seismic isolation devices. The major architectural particularities of base isolated buildings are also shown. In the second part of the paper, the efficiency of seismic isolation was analysed for an idealised typical European residential/office reinforced concrete building subjected to various intensities and frequencies of ground motions. The simplest system of seismic isolation with lead rubber bearings and foundation girders was used. The results of non-linear time-history analyses for ten selected earthquake ground motions are presented in terms of maximum displacements and damage indicators for isolated and non-isolated structures. The obtained results prove the effectiveness of the base isolation system, since first significant damage appears at the two times bigger design ground acceleration. A special case where the base isolation could become dangerous for the superstructure is shown for the case of ground motions with long prevailing period characteristic for bad soil conditions.

## 1 • UVOD

Potresna izolacija predstavlja pomembno alternativo za gradnjo stavb na potresnih območjih, saj lahko z njo preprečimo oziroma zmanjšamo poškodbe konstrukcij v primeru močnejšega potresa. Naprave potresne izolacije podaljšujejo nihajno dobo konstrukcije in/ali povečujejo sposobnost sipanja energije ter s tem reducirajo potresne sile, ki jih mora prenašati konstrukcija. V začetku se je potresna izolacija v svetu uporabljala največ pri konstrukcijah posebnega pomena (npr. bolnišnice, telekomunikacijski centri, jedrski reaktorji ipd.), danes pa se čedalje pogosteje uporablja tudi pri običajnih stanovanjskih in poslovnih stavbah, pri povečanju potresne varnosti starejših objektov (sanacije) ali pri zaščiti dragocene opreme (npr. v muzejih, laboratorijih ipd.). Tovrstna tehnologija je bila v Sloveniji uspešno uporabljena pri gradnji nekaterih večjih mostov in viaduktov avtocestnega križa – glej npr. (Fischinger, 2001) ali (Isaković, 2003), o njeni uporabi pri stavbah pa se zaenkrat sploh ne razpravlja, niti pri gradnji pomembnejših objektov (npr. bolnišnice, laboratoriji ipd.). Tako se na primer pri gradnji Onkološkega inštituta v Ljubljani ni niti razmišljalo o tovrstnih rešitvah za povečanje potresne var-

nosti. Številne tuje izkušnje in aplikacije ter tudi številne raziskave pri nas in v tujini pa potrjujejo učinkovitost in smotnost uporabe potresne izolacije. Nadalje se je pri finančni oceni investicije v konstrukcijo pomembno zavedati, da klasično grajenega in potresno izoliranega objekta ni možno neposredno primerjati samo po ceni, saj igra v tem primeru odločilno vlogo bistveno boljše obnašanje izoliranega objekta pri močnem potresu. Če upoštevamo, da ostane izolirana konstrukcija pri močnem potresu praktično nepoškodovana, je uporaba izolacije tudi iz ekonomskega vidika še kako upravičena. Kot edini večji problem v praksi se tako ne zdi pomanjkanje ustreznega znanja ali kadra, temveč predvsem praktičnih izkušenj in zavednejših investitorjev, ki jim skrb za dolgoročno varnost stavbe ni tuja.

Potrebno se je zavedati, da je potresna izolacija tehnologija, ki ni uporabna prav za vsako vrsto konstrukcije, temveč prvenstveno za tiste z večjo togostjo in krajšim nihajnim časom. Posebej zanimiva se zdi uporaba izolacijskih sistemov pri »arhitekturno posebnih« stavbah, kot so stavbe z neregularnimi tlorisi ali nepravilnostmi po višini, ki so zato potresno bolj ogrožene. Projektiranje kon-

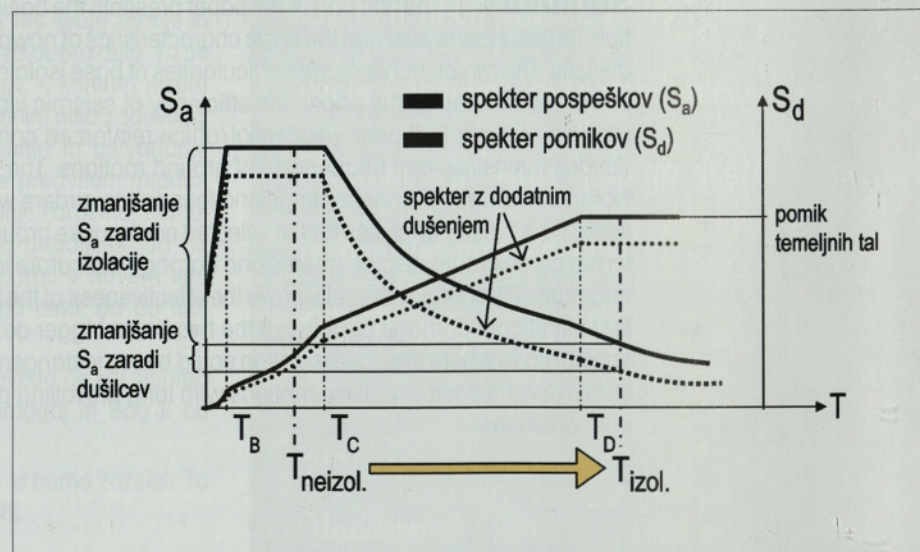
strukcij v arhitekturi namreč pogosto temelji na popolnoma drugačnih izhodiščih, kot je gola konstrukcija in njena varnost. S stališča arhitekturnega projektiranja konstrukcij so zato predvsem zanimive možnosti za povečanje varnosti neregularnih konstrukcij s pomočjo potresne izolacije. To področje ostaja slabo raziskano, tovrstne raziskave in analize pa so že v teku in so del raziskovalnega projekta z naslovom Uvajanje naprednih tehnologij za povečanje varnosti v arhitekturi sodobnih stanovanjskih stavb, ki ga vodi prvi avtor.

V prvem delu članka je prikazan osnovni princip delovanja potresne izolacije in kratek pregled glavnih značilnosti in proizvajalcev danes najpogosteje uporabljenih naprav potresne izolacije v svetu. Praktična uporaba potresne izolacije stavb je ilustrirana z orisom zgodovinskega razvoja in statistike zgrajenih potresno izoliranih stavb v svetu. V ločenem poglavju so na kratko prikazane tudi glavne arhitekturne posebnosti potresno izoliranih stavb. V drugem delu članka smo učinkovitost potresne izolacije analizirali na primeru za Slovenijo tipične štirietažne armiranobetonске stanovanjsko/poslovne stavbe, izpostavljene različnim intenzitetam in frekvencam vznemanja. Prikazana je primerjava obnašanja klasične neizolirane konstrukcije in konstrukcije, izolirane z elastomernimi ležišči s svinčenimi jedri.

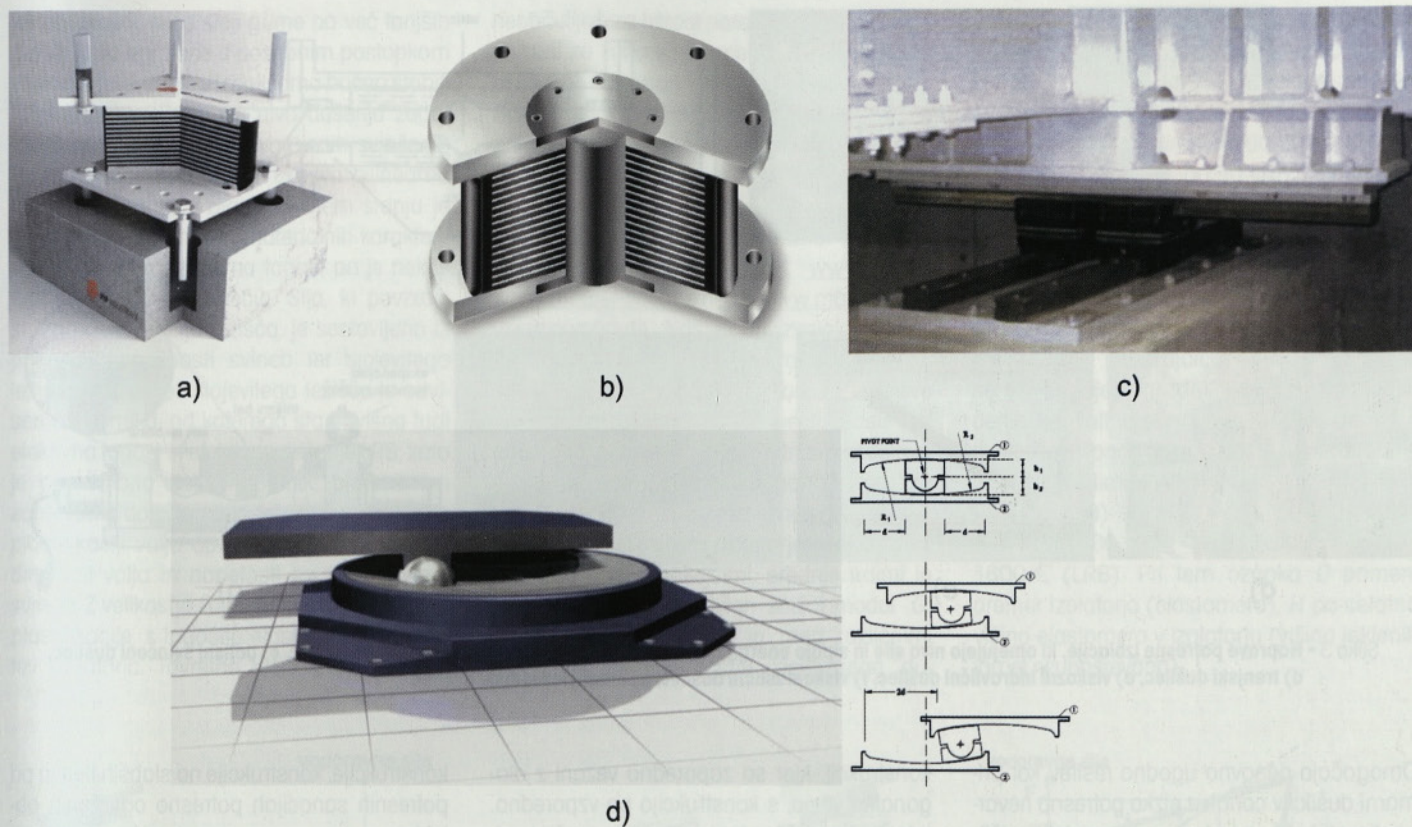
## 2 • SPLOŠNO O POTRESNI IZOLACIJI

### 2.1 Princip potresne izolacije

Poglavitna prednost uporabe izolacijskih naprav je zmanjšanje energije, ki jo potres dovaža v konstrukcijo, s čimer reduciramo tudi potresne sile, ki delujejo na konstrukcijo. To dosežemo z vstavljanjem posebnih mehkih elementov (ležišč) v konstrukcijo, ki podaljšajo nihajno dobo konstrukcije in/ali z vstavljanjem dušilcev za sipanje potresne energije. Na sliki 1 je na primeru elastičnega spektra pospeškov ( $S_a$ ) prikazan vpliv podaljšanja nihajne dobe ( $T_{neizol.} \rightarrow T_{izol.}$ ) in povečanja dušenja. Kot je razvidno iz slike, so pospeški izolirane konstrukcije bistveno manjši. Primerjava spektrov pomikov ( $S_d$ ) kaže, da pomiki tal z večanjem nihajne dobe konstrukcije naraščajo. Zmanjšanje pospeškov je posledica večjega nihajnega časa pa tudi povečanja dušenja. Konstrukcija postane z vgradnjo



Slika 1 • Vpliv potresne izolacije in dušilcev na pospeške in relativne pomike konstrukcije glede na tla



Slika 2 • Naprave potresne izolacije, ki podaljšajo nihajni čas: a) navadno elastomerno ležišče, b) elastomerno ležišče s svinčnim vstavkom, c) ravno drsno ležišče in d) konkavno drsno ležišče

izolacijskega sistema podajnejša, pomiki izolacijskega sistema pa so pri zelo podajnih izolatorjih lahko enaki pomikom temeljnih tal. Relativni pomiki zgornje konstrukcije pa so precej manjši in konstrukcija ostaja v elastičnem območju. Naloga konstrukterja je, da vgradi takšen izolacijski sistem, ki bo zagotavljal elastično obnašanje zgornje konstrukcije, pri čemer pa morajo pomiki izolacijskega sistema ostati čim manjši. V primeru velikih pomikov temeljnega sistema si je potrebno pomagati z dodatnimi dušilci in omejevalci pomikov. Njihov pregled bo prikazan v naslednjem poglavju.

## 2.2 Naprave potresne izolacije

Opisi in slike posameznih naprav potresne izolacije so povzeti po razpoložljivi domači in tuji literaturi, glej npr. (Fischinger, 2001), (Naeim, 1999), (Skinner, 1993), (Kelly, 1997), (Eggert, 2002) in izbranih člankih ter internetnih virih, podanih na koncu članka.

Glede na princip delovanja ločimo dve osnovni skupini izolacijskih naprav:

(a) naprave, ki podaljšajo nihajni čas konstrukcije (slika 2) in

(b) naprave, ki omejujejo nivo sile in sipajo energijo (slika 3).

Za prvo skupino je značilna velika podajnost in sipanje dovedene energije v obliki elastične energije. To so na primer elastomerna, drsna in druga ležišča:

a) **Slojevita elastomerna ležišča, ojačena s tankimi jeklenimi ploščami (RB - Rubber Bearings):** V elastomer so s postopkom vulkanizacije vgrajene jeklene plošče, ki povečajo stabilnost naprave. Ležišča odlikuje čisto elastično obnašanje. Uporabljajo se elastomeri z različnimi stopnjami dušenja (5–20 %).

b) **Slojevita elastomerna ležišča s svinčnimi vstavki, ojačena s tankimi jeklenimi ploščami (LRB - Lead Rubber Bearings):** Svinčni vstavek zagotavlja učinkovit mehanizem sipanja energije. Ležišče se obnaša izrazito bilinearno (podrobnejši opis je podan posebej v nadaljevanju).

c) **Drsna teflonska ležišča (PTFE Sliding Bearings):** Uporabljajo se za sprostitvev pomikov, koeficient trenja med teflonom in nerjavnim

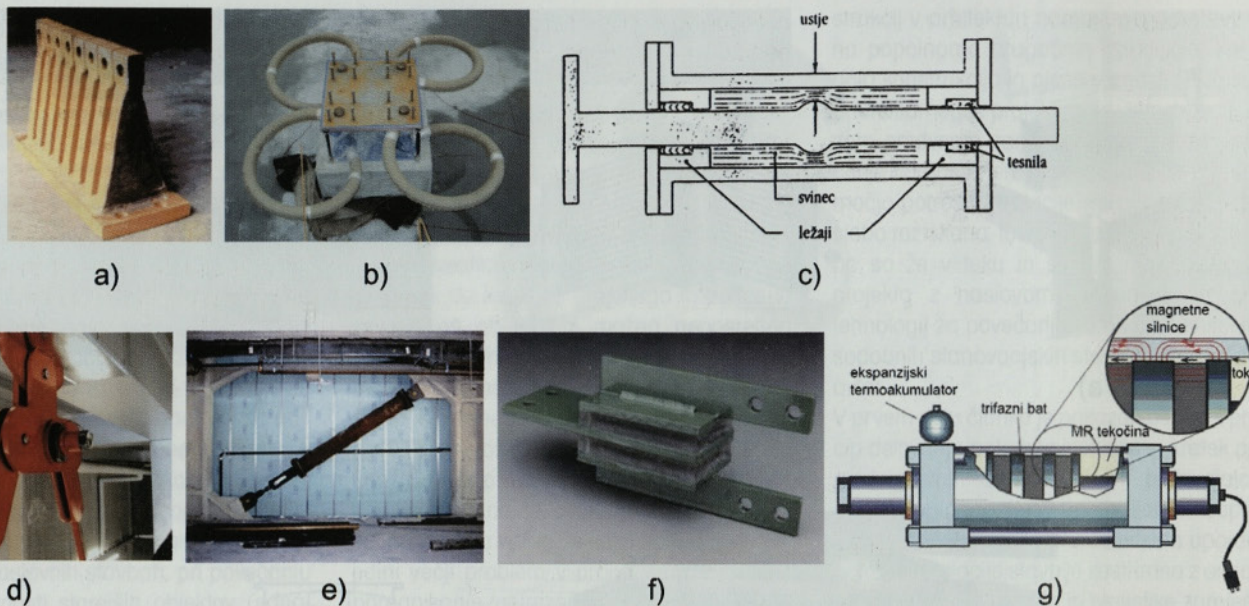
jeklom zmanjšamo z uporabo premazov. Slabost ležišč je izostanek ohranjevalne sile in posledično nastanek trajnih pomikov.

d) **Konkavna drsna ležišča (FPB - Friction Pendulum Bearings):** Delujejo po principu drsnega nihala: sferična drsna ploskev zagotavlja potrebno ohranjevalno silo, trenje med drsnikom in sferično drsno ploskvijo pa zagotavlja določeno stopnjo dušenja. Efektivno togost izolatorja in posledično nihajni čas izolirane konstrukcije določamo z radijem ukrivljenosti konkavne ploskve.

Za drugo skupino pa je značilno elasto-plastično obnašanje z zelo nizko stopnjo utrjevanja. Tovrstne naprave imajo navadno veliko zmoglost sipanja energije in posledično zmanjšujejo pomike. To so različni dušilci, blažilci in omejevalci pomikov:

a) **Jekleni histerezni dušilci različnih oblik:** Energija se sipa s plastifikacijo jekla. Zaradi občutljivosti jekla za utrujanje je potrebno zagotoviti ustrezno konstrukcijsko jeklo.

b) **Podporni jekleni in svinčeni dušilci:** Potresno energijo sipajo preko podajnosti elementov (vzmeti) in plastifikacije materiala.



Slika 3 • Naprave potresne izolacije, ki omejujejo nivo sile in sipajo energijo: a) jekleni histerezni dušilec, b) podporni dušilec, c) potisni svinčeni dušilec, d) trenjski dušilec, e) viskozni hidravlični dušilec, f) viskoelastični dušilec, g) magnetoreološki dušilec

Omogočajo cenovno ugodno rešitev kot primarni dušilci v conah z nizko potresno nevarnostjo ali kot sekundarni pri kompleksnejših sistemih, kjer je potrebna določena stopnja dušenja.

c) **Potisni svinčeni dušilci:** Med procesom potiskanja svinca skozi ustje se potresna energija znotraj jeklene komore spreminja v toploto. Obnašanje dušilcev je izrazito plastično, neobčutljivo za utrujanje, njihova slabost je izostanek ohranjevalne sile.

d) **Trenjski dušilci:** Imajo odlične sposobnosti sipanja energije preko mehanizma trenja pri medsebojnem drsenju dveh trdih delov (enak princip kot v avtomobilskih zavornih sistemih). Kot najboljši se kažejo dušilci na osnovi trenja nerjavnega jekla v stiku z medenino ali navadnim jeklom. Cenovno so relativno ugodni ter enostavni za vgradnjo in vzdrževanje. Navadno se uporabljajo znotraj poveznih diagonal, lahko pa jih namestimo tudi v horizontalni ravnini.

e) **Viskozni hidravlični dušilci:** Po zgradbi in delovanju so zelo podobni avtomobilskim amortizerjem. Običajno so sestavljeni iz pomičnega bata, ki se pomika skozi stisljiv viskozni medij znotraj jeklene komore. Medtem ko se bat pomika skozi medij, ustvarja silo  $F = c \cdot v^\alpha$  ( $c$  predstavlja koeficient dušenja,  $v$  hitrost bata, parameter  $\alpha$  pa odraža lastnosti naprave – običajne vrednosti so med 0,3 in 1,0). Največ se uporabljajo kot del diagonalnih povezij jeklenih in armiranobetonskih

konstrukcij, kjer so zaporedno vezani z diagonalno vezjo, s konstrukcijo pa vzporedno. Interakcija dušilec-konstrukcija je močno odvisna od deformacij konstrukcije.

f) **Viskoelastični dušilci:** Delujejo na osnovi visoko dušilnih polimernih elastomerov, pritrjenih na jeklene plošče. Relativni pomiki med stranskimi jeklenimi ploščami in sredinsko jekleno ploščo povzročijo strižno deformiranje viskoelastičnega materiala in s tem sipanje inducirane energije. Imajo podobne lastnosti kot viskozni dušilci, le da je njihovo obnašanje odvisno tako od hitrosti kot tudi od pomikov.

g) **Magnetoreološki (MR) dušilci:** Sistem spada med napredno tehnologijo v potresni izolaciji, sicer pa načeloma sodi med viskozne sisteme, pri katerih s spreminjanjem jakosti električnega toka vplivamo na uporabnost dušilca in s tem na sile, ki jih dušilec nevtralizira med potresom. Zaradi prilagodljivosti upora, ki ga omogoča MR tekočina, imajo ti dušilci lahko manjše dimenzije in se lažje vgradijo. Tudi tok, ki je potreben za generacijo magnetnega toka, je lahko majhen (1–2 ampera).

Dušilci se pogosto vgrajujejo tudi v samo konstrukcijo, med elemente, ki so izpostavljeni večjim relativnim pomikom, kot so na primer elementi povezij v okvirnih konstrukcijah, dilatacije ipd. V splošnem so nekoliko manj učinkoviti od ležišč, saj se aktivirajo šele ob določeni stopnji deformiranja konstrukcije in se zato uporabljajo predvsem za podajnejše

konstrukcije, konstrukcije na slabših tleh in pri potresnih sanacijah potresno ogroženih objektov.

Poznamo tudi druge sisteme potresne izolacije stavb, kot so na primer sistemi z nihajočo maso (TMD – tuned mass damper), razni sistemi na osnovi vzmeti (več glej npr. <http://www.gerb.com>) idr. Sistemi z nihajočo maso se vgradijo na vrh ali v vmesne etaže visokih stavb – stolpnice (najbolj poznana primera uporabe sta stolpnici Taipei in Burj al-Arab), kjer sistem niha v nasprotni smeri, kot niha konstrukcija in tako blaži vplive vetra/potresa, ki se prenašajo na konstrukcijo. Najnovejše raziskave na področju naprav potresne izolacije so usmerjene v razvoj novih inteligentnih naprav, pri katerih preko procesne enote in kontrolnega sistema krmilimo odziv izolacijskih naprav in posledično konstrukcije – glej npr. (Isaković, 2005) ali (Zevnik, 2006).

### 2.3 Karakteristike, proizvajalci in cena elastomernih ležišč s svinčnimi jedri

Podrobneje si oglejmo elastomerna ležišča s svinčnimi jedri (Lead Rubber Bearing – LRB), ki jih bomo uporabili tudi pri naši primerjalni analizi v drugem delu. Elastomerna ležišča s svinčnimi jedri so bila razvita na Novi Zelandiji v sedemdesetih letih 20. stoletja in predstavljajo danes najpogostejše vgrajeno in tudi cenovno ugodno potresno izolacijo. Ležišča imajo zgoraj in spodaj dve debeli

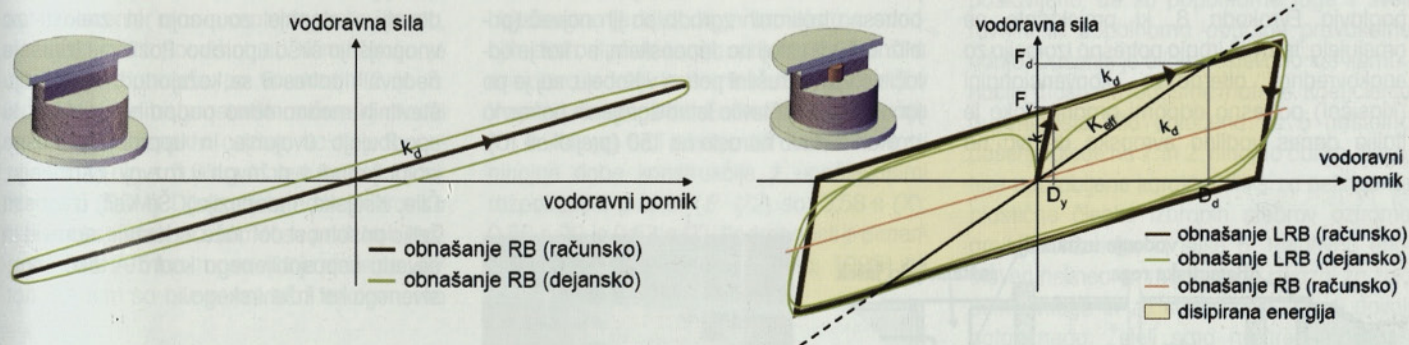


jekleni plošči, med sloji gume pa več tanjših plošč, ki so vgrajene s posebnim postopkom vulkanizacije. Z njimi izboljšamo bočno stabilnost naprave. Potreben nivo dušenja zagotavlja eno ali več tesno vgrajenih svinčenih jeder. Ležišče se obnaša izrazito bilinearno (slika 4). Togost v plastificiranem stanju je odvisna od dimenzij in materialnih karakteristik elastomera, začetna togost pa je nekajkrat (6 do 10-krat) večja. Sila, ki povzroči strižno deformacijo ležišča, je sestavljena iz prispevka nosilnosti svinca ter slojevitega ležišča. Prispevek slojevitega ležišča je odvisen od pomika, od katerega sta odvisna tudi efektivna togost in efektivno dušenje LRB, zato je pomembno določiti pomik, pri katerem zahtevamo določeno stopnjo dušenja. Silo ob plastifikaciji valja aproksimiramo na osnovi dimenzij valja in napetosti na meji tečenja svinca. Z velikostjo valja torej določamo mejo plastifikacije, s togostjo elastomera pa utrditev izolatorja. Tovrstno ležišče je praktično

neobčutljivo za hitrost naraščanja deformacij, pa tudi za zunanjo temperaturo, utrujanje in vertikalno obtežbo.

Danes je na tržišču prisotnih kar nekaj priznanih proizvajalcev naprav potresne izolacije, ki ponujajo kompletno paleto s širokim izborom elastomernih ležišč. Celostno ponudbo lahko na primer najdemo na straneh: [www.fip-group.it](http://www.fip-group.it), [www.alga.it](http://www.alga.it), [www.maurer-soehne.de](http://www.maurer-soehne.de), [www.mageba.ch](http://www.mageba.ch), [www.gumba.de](http://www.gumba.de). Našteti proizvajalci so vodilni evropski proizvajalci elastomernih ležišč, poleg njih pa izdelujejo tudi ostale naprave potresne izolacije. Zaradi specifičnosti posameznih projektov se industrijska izdelava potresnih izolatorjev lahko popolnoma prilagaja potrebam posameznega projekta, vključno s testiranjem izolatorjev. Tako lahko izbiramo med mehkejšimi, srednje trdimi in tršiimi elastomeri (različen strižni modul  $G$ : od 0,4 do 1,4 N/mm<sup>2</sup>) in med različnimi stopnjami ekvivalentnega viskoznega du-

šenja (od 10 do 15 %, oziroma celo do 25 % in več v primeru elastomernih ležišč s svinčnimi jedri). Glede na projektne pomike lahko danes na tržišču izbiramo med ležišči različnih dimenzij (premera od 20 do 120 cm in več, v skupni višini do 50 cm). Za osnovne variante ležišč znašajo največje vrednosti dopustnih pomikov približno 40 cm. Dopustna tlačna napetost ležišč v potresnem projektanem stanju pa znaša približno 1,25 kN/cm<sup>2</sup>. Cene ležišč so močno odvisne od velikosti in karakteristik, proizvajalca, velikosti naročene serije, pogojev vgradnje, pogodbeno vključenih konzultantskih ur in drugih pogojev. Ilustrativno podajamo okvirne cene srednje trdih ležišč: dimenzija  $D/H$  450/150 mm – od 2300 € (RB) do 2800 € (LRB), dimenzija  $D/H$  350/100 mm – od 1300 € (RB) do 1600 € (LRB). Pri tem oznaka  $D$  pomeni premer izolatorja (elastomera),  $H$  pa celotno višino elastomera v izolatorju (višina jeklenih lamel ni upoštevana).



Slika 4 • Razlika v obnašanju slojevitnega elastomernega ležišča brez (RB) in s svinčnim jedrom (LRB)

### 3 • UPORABA POTRESNE IZOLACIJE V PRAKSI

#### 3.1 Zgodovinski pregled in sedanje stanje

Razpoložljiva literatura s pregledom uporabe potresne izolacije od njenih začetkov do danes je zelo obsežna, v pregledu in prikazu sedanjega stanja smo izhajali predvsem iz naslednjih virov: (Kelly, 1997), (Martelli, 1998), (Martelli, 2006), (Naeim, 1999), (Pan, 2005), (Melkumyan, 2006), (Assisi, 2007) ter internetnih virov, podanih na koncu članka. Prve zapise o potresni izolaciji zasledimo v spisih rimskega zgodovinarja Gaja Plinija Sekundija iz 1. stoletja našega štetja, v katerih opisuje zasnovo grškega templja boginje Diane v Efezu, ki je imel pod temelji položen sloj

iz drobcev premoga in sloj nastrižene volne. Potresno izolacijo je leta 1909 patentiral angleški zdravnik J.A. Calantarients. Njegov patent opisuje poseben način gradnje, pri katerem med objekt in njegove temelje oziroma podzemeljske dele vstavimo posebne sloje (pesek, sljuda, lojavec) in s tem ločimo gibanje konstrukcije od gibanja tal. Tudi pri nas ideja in celo aplikacija potresne izolacije sploh ni nova. Po mnenju mnogih strokovnjakov predstavlja prvo inženirsko uporabo potresne izolacije gradnja Nebotičnika v Ljubljani, ki ga od temeljev loči svinčena plošča, ki naj bi služila kot potresna izolacija. V času gradnje

(leta 1931) je namreč Nebotičnik predstavljal deveto najvišjo stavbo v Evropi! Danes izolacija Nebotičnika ni več funkcionalna, saj je le-ta obzidan z drugimi stavbami brez ustreznih dilatacij, ki bi omogočale prosto gibanje objekta. Kot primer prve uporabe izolacijskih sistemov, kot jih poznamo danes (elastomerna ležišča) pa velja osnovna šola v Skopju iz leta 1969, ki so jo projektirali švicarski inženirji. Zgradba je bila izolirana z velikimi elastomernimi bloki brez vmesnih ojačitvenih jeklenih lamel, ki se uporabljajo danes. Zato so bile vertikalne deformacije ležišč zaradi teže konstrukcije velike (okrog 25 %). Podrobnejši opis tega projekta lahko najdemo v (Naeim, 1999). Pomembno vlogo pri nadaljnjem razvoju modernih potresnoizolacijskih sistemov so imeli Francozi, ki so za zaščito svojih že zgra-

jenih jedrskih reaktorjev (dimenzioniranih na premajhen projektni pospešek tal) razvili lamelirana neoprenska ležišča, kasneje pa še posebne sisteme neoprenskih ležišč v kombinaciji z drsnimi elementi z visokim trenjem (t.i. EdF sistemi). Prva potresno izolirana stavba v Franciji je bila leta 1977 zgrajena trietažna šola v mestecu Lambesc, ki je bilo v potresu leta 1909 delno porušeno. Hkrati s Francozi pa so z razvojem potresno-izolacijskih naprav začeli tudi Novozelanci in Rusi. Prvi veljajo za izumitelje elastomernih ležišč s svinčnimi jedri, drugi pa so razvijali nizkocenovna ležišča za stavbe. Tudi v Italiji so svojo prvo potresno izolirano stavbo (glavna gasilska centrala v Neaplju) zgradili leto po rušilnem potresu Campano-Lucano (1980) na podlagi pozitivnih izkušenj obnašanja njihovih potresno izoliranih viaduktov med tem potresom. Pomemben mejnik pri projektiranju potresno izoliranih stavb v Italiji pomeni leto 2003, ko je stopil v veljavo nov predpis z novo klasifikacijo potresno ogroženih območij Italije. V bistvu gre za razširjena poglavja Evrokoda 8, ki projektante ne omejujejo, temveč imajo potresno izolacijo za enakovredno alternativo konvencionalni (klasični) potresno odporni gradnji. Tako je Italija danes vodilna evropska država na

področju razvoja, industrije in uporabe potresne izolacije, število njenih aplikacij iz leta v leto hitro narašča. Število stavb, izoliranih z najrazličnejšimi izolacijskimi sistemi, znaša danes že okrog 100, med njimi pa je poleg posebnih in javnih objektov (centrale, laboratoriji, bolnišnice, šole itd.) vedno več tudi (zasebnih) stanovanjskih objektov (prvega so zgradili leta 1992 v Kalabriji). Ob tem pa se potresna izolacija veliko uporablja tudi pri sanacijah oziroma povečanju potresne varnosti starejših objektov, kot so šole, cerkve in zgodovinsko pomembni objekti, vključno z njihovo opremo. Leta 1985 se je uporaba potresne izolacije začela tudi v ZDA in na Japonskem. Nadaljnji razvoj in raziskovalno delo na področju potresne izolacije, posebej pa odlično obnašanje mnogih potresno izoliranih objektov med močnimi potresi v zadnjih tridesetih letih, so vodili v nove aplikacije potresne izolacije po celem svetu.

Po zadnjih razpoložljivih podatkih iz leta 2006 imamo danes po celem svetu približno 4500 potresno izoliranih konstrukcij stavb. Od vseh potresno izoliranih zgradb pa jih največ (približno 70 %) stoji na Japonskem, na kar je odločilno vplival rušilni potres v Kobeju, saj je po januarju 1995 število letno zgrajenih potresno izoliranih stavb naraslo na 150 (prej okoli 10).

Danes je na področju potresne izolacije Japonska vodilna država na svetu, ki razvija in v prakso uvaja tudi zanimive novosti, kot so potresna izolacija visokih stolpnih, gradnja velikih potresno izoliranih temeljnih ploščadi, izolacija lahkih (lesenih) konstrukcij in druge.

Presenetljivo visoko mesto zavzema Kitajska, ki je v zelo kratkem času (zadnjih 15 let) zgradila skoraj 500 potresno izoliranih, predvsem stanovanjskih stavb, od katerih je kar polovica zidanih. Relativno majhno število (200) potresno izoliranih stavb štejejo ZDA, čemur pa je vzrok konservativna oziroma zavirajoča drža veljavnih standardov do prednosti oziroma ugodnosti, ki jih prinaša potresna izolacija. Skoraj polovico vseh potresno izoliranih stavb v ZDA predstavljajo potresno sanirani starejši objekti! Ob omenjenih državah se potresna izolacija vedno več vgrajuje tudi v Rusiji (500), Armeniji (19), Novi Zelandiji (11), Turčiji, Grčiji, Portugalski, Mehiki, Južni Koreji idr.

Lahko rečemo, da je potresna izolacija z izkušnjami nedavnih potresov dosegla zadovoljivo stopnjo zaupanja in zrelosti za vnaprejšnjo širšo uporabo. Pozitivne izkušnje nedavnih potresov se kažejo tudi v izvajanju številnih mednarodno podprtih projektov, ki spodbujajo uvajanje in uporabo potresne izolacije tudi v državah v razvoju (Armenija, Čile, Kitajska, Indonezija). Še več, izkoristiti želijo prisotnost domače industrije, surovin in seveda usposobljenega kadra – tako znanstvenega kot inženirskega.

### 3.2 Arhitekturne posebnosti

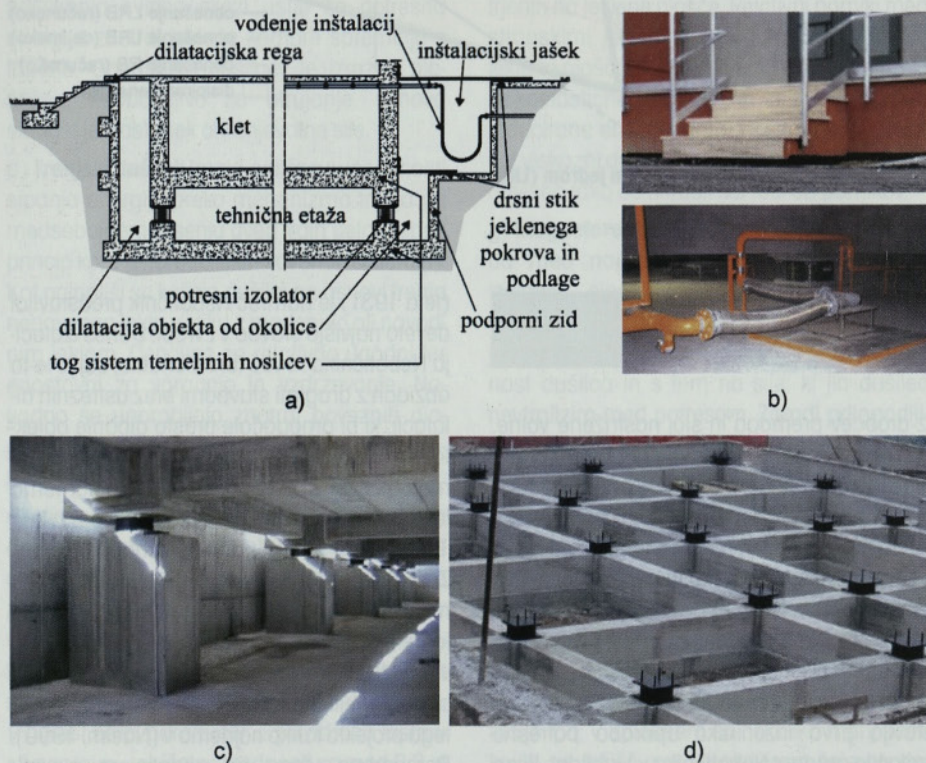
Tehnologija potresne izolacije prinaša v arhitekturo številne prednosti pa tudi z njo povezane pomembne razlike v primerjavi s klasično grajenimi stavbami – tako pri zasnovi konstrukcije kot tudi pri izvedbi temeljev, dostopov in vodenju inštalacij. Najpomembnejše so (slika 5):

- **Temeljni nosilci in tehnične etaže**, ki omogočajo vgradnjo, pregledovanje, vzdrževanje in morebitno zamenjavo naprav med življenjsko dobo konstrukcije;

- **Ločitev (dilatacija) objekta od okolice**, da se lahko med potresom objekt prosto giblje v vseh smereh (stopnišča, dostopi, kletni prostori);

- **Posebno (dilatirano) vodenje inštalacij**, kar dosežemo s posebnimi spoji – vse napeljave skozi dilatacije okrog izolirane konstrukcije morajo namreč v stanju omejenih poškodb ostati elastične;

- **Posebna pravila, vezana na togost in gabarite stavbe**, saj je potresna izolacija pri-



Slika 5 • Arhitekturne posebnosti potresno izoliranih stavb: a) shematski prikaz, b) dilatacija c) stopnišča (zgoraj) in vodenje inštalacij (spodaj), tehnična etaža, d) temeljni nosilci

merma za konstrukcije z večjo togostjo in krajšim nihajnim časom, pomembno pa je tudi razmerje višina-širina stavbe oziroma njena vitkost. S stališča arhitekture potresno izoliranih stavb so slednje omejitve posebej za-

nimive, zato nameravamo v prihodnosti tudi to podrobneje analizirati. Sicer je področje vezano na zasnovo geometrije potresno izoliranih stavb tudi na splošno slabo raziskano in posledično so tudi objave redke – primer glej

npr. (Li, 2006), ki podaja odvisnost razmerja višina-širina izolirane stavbe od različnih parametrov: kakovosti tal, intenzitete potresa, nihajne dobe konstrukcije in od razporeditve ležišč.

## 4 • ANALIZA UČINKOVITOSTI SISTEMA POTRESNE IZOLACIJE Z ELASTOMERNIMI LEŽIŠČI

### 4.1 Opis modela

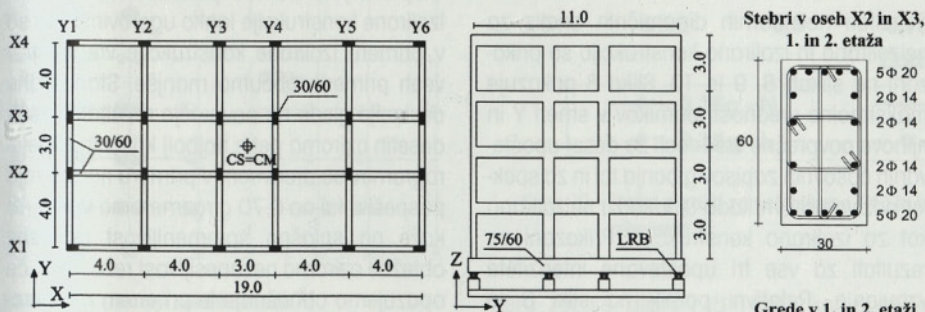
Učinkovitost potresne izolacije smo analizirali na primeru idealizirane štiritetažne armirano-betonske okvirne konstrukcije, ki bi bila lahko tipičen predstavnik današnje stanovanjske ali poslovne gradnje v evropskem prostoru pa tudi pri nas. Osnovni sistem je prostorski okvir, predelne in fasadne stene so zaradi možnih sprememb namembnosti izvedene kot nenosilne konstrukcije. V bistvu gre za popolnoma pravilno dvojno simetrično konstrukcijo, pri kateri se center mas in center togosti ujemata, neregularnosti po višini ni. Konstrukcija je bila dimenzionirana po Evrokodih 2 in 8. Uporabljen je bil prostorski računski model in metoda s spektri odziva: tla tipa B, pospešek tal  $a_g = 0,35$  g in redukcijski faktor  $q = 3,75$  (DCM). Dimenzije gred in stebrov so bile enake v vseh etažah. Masa prvih treh etaž je znašala 295 ton, masa vrhne etaže pa 237 ton. Pri tem so bile mase etaž enakomerno

porazdeljene po vseh 24 vozliščih posamezne etaže. Celotna prečna sila je znašala 23 % skupne teže konstrukcije. Različne potrebe po nosilnosti stebrov in gred so bile dosežene s spreminjanjem armature v posameznih okvirih in v posameznih etažah. Vzдолžna armatura v gredah je bila izračunana s programom SAP2000 (SAP2000, 2001). Pri določanju armature stebrov je bila upoštevana metoda varovalke na način, kot to zahteva Evrokod 8. Upoštevano je bilo, da je armatura v spodnjih dveh etažah enaka, prav tako je enaka armatura v tretji in četrti etaži. Vsi okvirji v Y smeri so identični. Enaka sta tudi okvirja X1 in X4, pa tudi okvirja X2 in X3. Prve tri nihajne dobe konstrukcije z upoštevanimi razpokanimi prerezi ( $E \cdot I/2$ ) so: 0,58 s (X), 0,56 s (Y) in 0,53 s (T). Podrobnosti o dimenzioniranju so opisane v (Faella, 1998) ali (Kilar, 2001).

### 4.2 Numerično modeliranje in zapisi potresov

Nelinearne statične in dinamične analize so bile izvedene na 3D računskem modelu z računalniškim programom SAP2000, verzije 10.1.1. Nelinearen model je vključeval enosne bilinearne momentne členke, ki jih omogoča program. Le-ti so bili modelirani na obeh koncih vsake grede oziroma stebra. Grede so bile modelirane z upoštevanjem enosnega upogiba in striga. Pri stebrih je bil upoštevan upogib in strig v dveh smereh, pa tudi osne in torzijske deformacije. Vse strižne, osne in torzijske vzmeti so bile upoštevane kot elastične. Za medetažne plošče je predpostavljeno, da so popolnoma toge v svoji ravnini in popolnoma podajne pravokotno nanjo. Dušenje je bilo upoštevano kot kombinacija masne in togostne matrike. Koeficienta dušenja sta bila določena za 5 odstotno dušenje glede na 1. in 2. nihajno obliko. Nekatere uporabljene karakteristike za nelinearne plastične členke izbranih stebrov oziroma gred so razvidne iz slike 6. Relativno enostaven nelinearen model se je izkazal za zelo učinkovitega in za naše potrebe tudi dovolj natančnega. Želeli smo namreč model, s katerim bi lahko registrirali pojave poškodb v konstrukciji in tako vrednotili učinkovitost izbrane potresne izolacije. Detajlno nelinearno obnašanje ni bilo namen študije.

Možnost variacije potresne obtežbe je bila vključena z nelinearno analizo časovnega odziva stavb pri 10 različnih potresnih zapisih. Izbrali smo razpoložljive akcelerograme iz naše bližnje (evropske) okolice. Močnejše komponente posameznih potresov smo normirali na pospešek 0,35 g (na katerega je bila konstrukcija dimenzionirana), 0,525 g (50 % večji) in 0,70 g (100 % večji – pospešek enak dvakratnemu pospešku, na katerega je bila konstrukcija dimenzionirana) in jih pripisali opazovani smeri Y. Delovanje druge komponente v smeri X v predstavljeni fazi raziskave ni bilo upoštevano. Predhodne analize obnašanja neizolirane in izolirane konstrukcije pri enosmernem in dvosmernem vzbujanju so pokazale, da je upoštevanje samo »problematične smeri« na varni strani. Pripadajoči spektri odziva, povprečen spekter

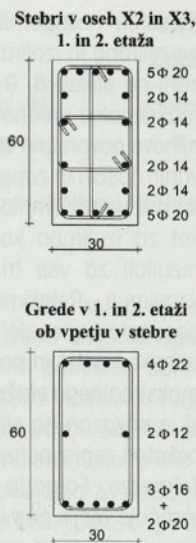


Karakteristike plastičnih členkov za izbrane prereze – enote so [m, kN, 10<sup>-2</sup>/m]

| Členek | Etaža | $L_p$ | $N$    | $M_y^-$ | $\Phi_y^-$ | $M_y^+$ | $\Phi_y^+$ | $M_u^-$ | $\Phi_u^-$ | $M_u^+$ | $\Phi_u^+$ |
|--------|-------|-------|--------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|
| Greda  | 1-2   | 0,324 | 0      | 295,8   | 0,51       | 253,6   | 0,49       | 309,4   | 5,61       | 263,2   | 6,52       |
| Steber | 1-2   | 0,284 | -437,8 | 446,6   | 0,61       | 446,6   | 0,61       | 520,1   | 1,98       | 520,1   | 1,98       |

$L_p$  - dolžina plastičnega členka, izračunana po (Paulay, 1992)

$M_{y(u)}^{\pm}$  in  $\Phi_{y(u)}^{\pm}$  - moment in ukrivljenost na meji tečenja (y) oz. pri porušitvi (u)



Slika 6 • Tloris in prečni prerez obravnavane konstrukcije s karakteristikami nekaterih plastičnih členkov

in elastični spekter po Evrokodu 8 so prikazani na sliki 7.

### 4.3 Izbran izolacijski sistem

Namen izolacijskega sistema je preprečiti oziroma minimizirati poškodbe konstrukcije ob potresu, poleg tega pa je s pravilno izbranim sistemom potrebno zagotoviti omejitev pomikov tal in tako preprečiti poškodbe ležišč in vodenih inštalacij. V našem primeru smo v ravnini nad temelji naredili temeljno brano iz armiranobetonskih nosilcev (60/75 cm, dodatna masa 218 ton) in enostaven sistem 24 enakih elastomernih ležišč s svinčeni jedri (LRB – Lead Rubber Bearings). Ležišča smo namestili centrično pod vse stebre v pritličju. Ustrezna ležišča smo izbrali iteracijsko glede na želen efektivni nihajni čas konstrukcije in na podlagi spremljanja nastalih poškodb v gredah in stebrih pri modalni analizi z elastičnim spektrom odziva ( $a_g = 0,35$  g, tla tipa B). Pri tem se z manjšanjem strižne togosti izolacije nihajna doba konstrukcije podaljšuje, relativni pomiki in z njimi poškodbe se manjšajo, pomiki izolacijskega sistema pa so čedalje večji. Izbrali smo okroglo elastomerno ležišče z naslednjimi karakteristikami (glej sliko 4):

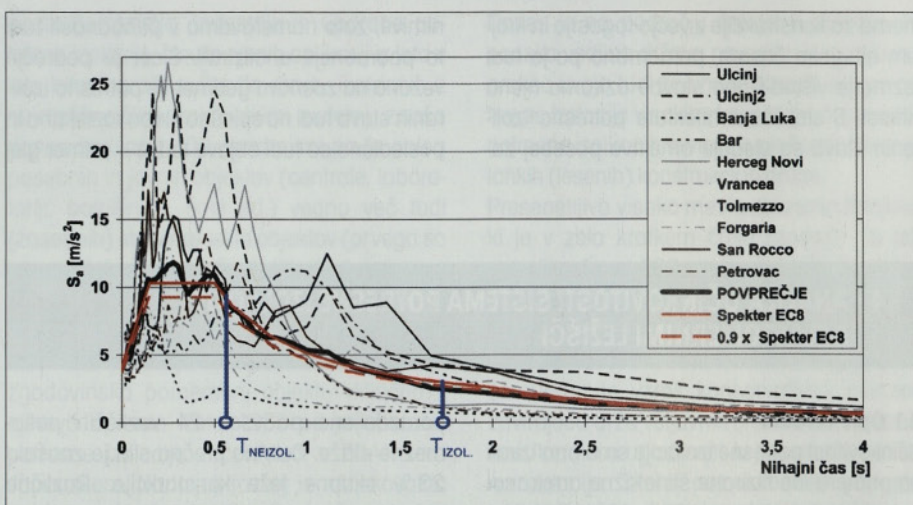
- efektivna strižna togost  $K_{eff} = 800$  kN/m, ekvivalentno efektivno dušenje  $C_{eff} = 22,1$  kNs/m (5 % kritičnega dušenja),
- začetna togost  $k = 4225$  kN/m, togost po plastifikaciji  $k_p = 650$  kN/m (tj. 15,4 % začetne togosti  $k$ ), ki je enaka strižni togosti elastomera, ki jo izračunamo po enačbi (1):

$$K_{strižno} = \frac{GA}{h}, \quad (1)$$

kjer je  $A$  prečni prerez elastomera (premer 350 mm),  $h$  višina elastomera (150 mm),  $G$  pa njegov strižni modul (1000 kN/m<sup>2</sup>),

- sila plastifikacije (meja tečenja za svinčeni vstavek)  $F_v = 47,3$  kN (pri pomiku  $D_v = 11,2$  mm).

Podobno ležišče lahko najdemo tudi v literaturi (Doudoumis, 2006). Elastomer in vmesne tanke jeklene plošče imajo premer 350 mm, zgornja in spodnja jeklena plošča pa 500 mm. Celotna debelina elastomera je 150 mm. Izbrani projektni pomik ležišč  $D_{el}$ , na katerega so bila ležišča tudi dimenzionirana, je znašal 15 cm. Za zagotovitev ustrezne začetne togosti in za povečanje zmoglosti sipanja energije je v sredini elastomera vgrajeno svinčeno jedro premera 77 mm. Oblikovni faktor  $S$  (Naeim, 1999) izbranega ležišča znaša 11,7. Vertikalno togost ležišča izračunamo iz (Fischinger, 2001):



Slika 7 • Elastični spektri odziva za upoštewane zapise gibanja tal in Evrokodov spekter za tla tipa B in nihajne dobe konstrukcije v opazovani smeri

$$K_v = \frac{A}{h} (6GS^2 + \kappa), \quad (2)$$

kjer je  $A$  prečni prerez elastomera,  $h$  višina elastomera (150 mm) in  $k$  kompresijski modul (2000 MPa). Obnašanje ležišča v vertikalni smeri je predpostavljeno elastično. Z vgradnjo ležišč konstrukciji podaljšamo nihajni čas in v našem primeru znašajo prve tri nihajne dobe nove izolirane konstrukcije: 1,73 s (X), 1,73 s (Y) in 1,72 s (T).

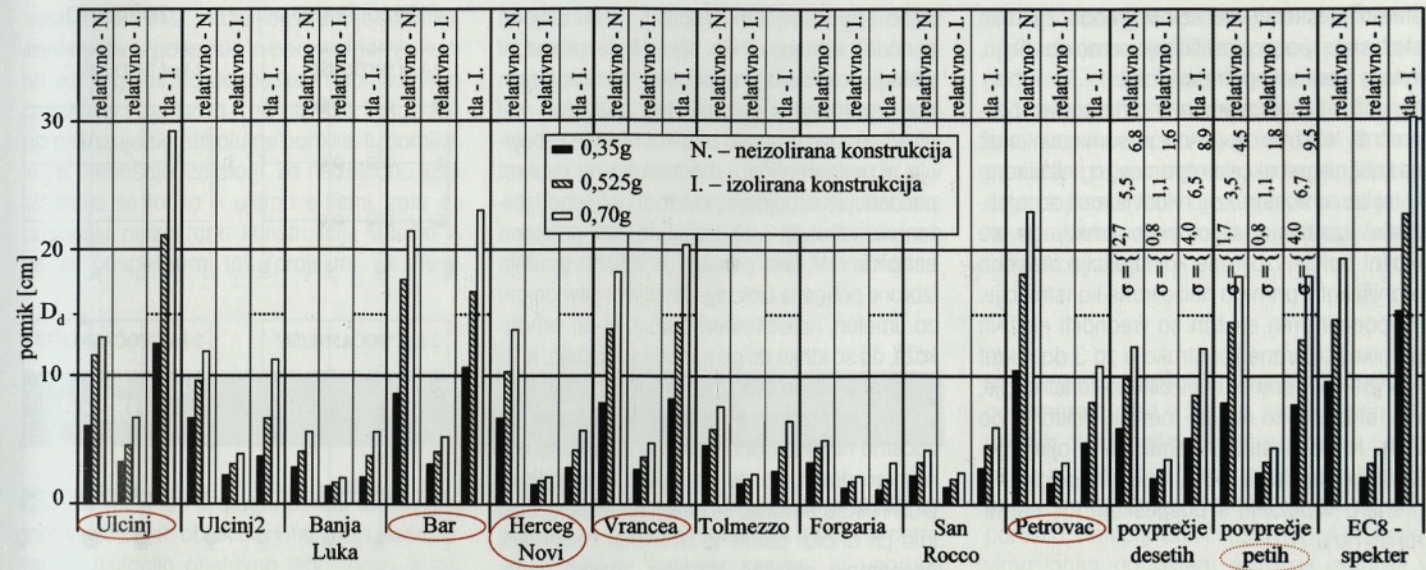
### 4.4 Primerjava obnašanja potresno izoliranih in potresno neizoliranih stavb pri različnih intenzitetah vzbujanja

Rezultati nelinearnih dinamičnih analiz za neizolirano in izolirano konstrukcijo so prikazani na slikah 8, 9 in 10. Slika 8 prikazuje maksimalne vrednosti pomikov v smeri Y in njihove povprečne vrednosti za deset upoštevanih časovnih zapisov gibanja tal in za spekter odziva po Evrokodu 8, tako za neizolirano kot za izolirano konstrukcijo. Prikazani so rezultati za vse tri upoštewane intenzitete vzbujanja. Relativni pomik na sliki 8 je poenostavljeno definiran kot razlika med pomikom vrha in pomikom tal (za razliko od maksimalnega etažnega relativnega pomika, ki je prikazan na sliki 10). Vidimo lahko, da nekateri zapisi potresov (Ulcinj2, Banja Luka, Tolmezzo, Forgaria in San Rocco) ne povzročajo večjih pomikov oziroma poškodb niti pri neizolirani niti pri izolirani konstrukciji, saj njihova frekvenčna sestava ne povzroča resonančnih odzivov pri obravnavani konstrukciji. Ostalih pet potresnih zapisov (Ulcinj, Vrancea,

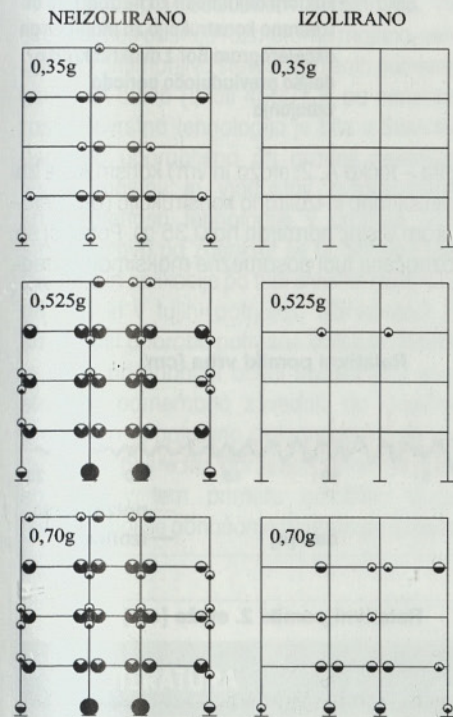
Petrovac, Herceg Novi in Bar) pa povzročajo večje pomike. Za neizolirano konstrukcijo sta najbolj kritična Bar in Petrovac, za izolirano pa Ulcinj in Bar. Povprečni odziv, dobljen z dinamično analizo, je primerljiv z rezultati, dobljenimi s spektrom odziva samo za akcelrograma Ulcinj in Bar. V vseh ostalih primerih pa nam račun s spektrom odziva po Evrokodu 8 daje rezultate, ki so na varni strani. Potres Petrovac, ki je najbolj kritičen pri neizolirani konstrukciji, pri izolirani konstrukciji ne povzroči večjih pomikov ali poškodb, saj ima izolirana konstrukcija drugačne dinamične karakteristike kot neizolirana.

Ob primerjavi relativnih pomikov neizolirane in izolirane konstrukcije lahko ugotovimo, da so v primeru izolirane konstrukcije vrednosti v vseh primerih občutno manjše. Standardne deviacije glede na povprečje rezultatov vseh desetih oziroma petih najbolj kritičnih akcelrogramov so predvsem v primeru normiranja pospeška tal na 0,70 g razmeroma velike. To kaže na splošno spremenljivost potresne obtežbe oziroma nezanesljivost rezultatov, če opazujemo obnašanje le pri enem akcelrogramu.

Obnašanje konstrukcij pri večjih intenzitetah vzbujanja je pričakovano – z večanjem intenzitete se pomiki povečujejo. Slednje velja predvsem za relativne pomike neizolirane konstrukcije ter pomike tal izolirane konstrukcije, medtem ko so relativni pomiki in z njimi poškodbe izolirane konstrukcije manj odvisni od intenzitete vzbujanja. Potresna izolacija torej ščiti zgornjo konstrukcijo tudi pri močnejših intenzitetah vzbujanja. V teh primerih lahko



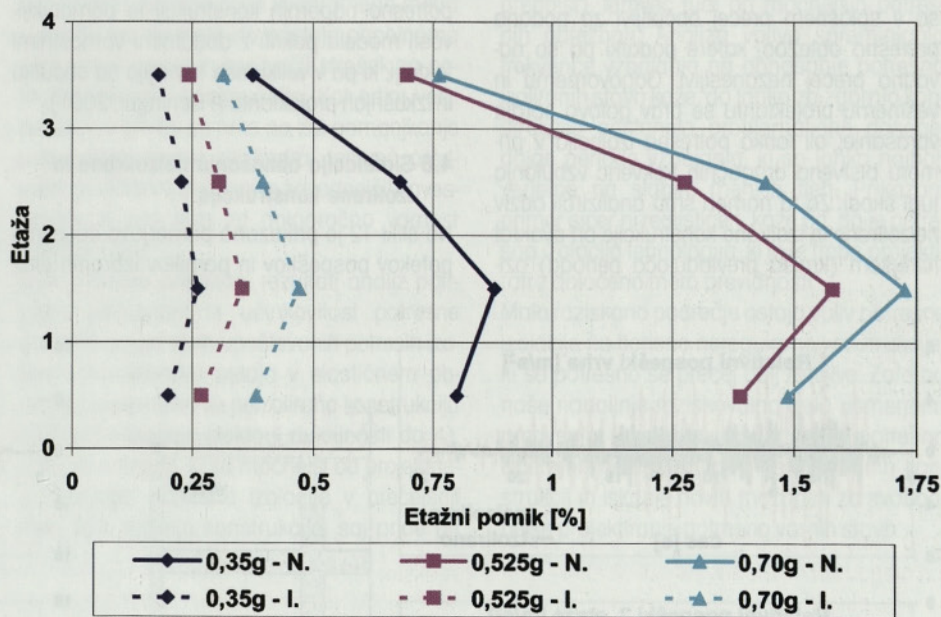
Slika 8 • Pomiki neizolirane in izolirane simetrične konstrukcije za 10 izbranih akcelerogramov, normiranih na projektni pospešek tal (0,35 g) ter na 50 in 100 % večji pospešek



LEGENDA (faktorji duktilnosti  $\mu$ ):  
 ○  $\mu = 1$  do 2    ○  $\mu = 2$  do 4    ●  $\mu > 4$     ● porušitev

Slika 9 • Faktorji duktilnosti za neizolirano in izolirano konstrukcijo - akcelerogram Ulcinj

zasledimo nekaj poškodb gred v zgornjih etažah, ki pa so občutno manjše kot v primeru neizolirane konstrukcije (slika 9). Pomik tal izolirane konstrukcije preseže projektni pomik elastomernega ležišča (15 cm) samo v pri-



Slika 10 • Etažni pomiki za neizolirano (N.) in izolirano (I.) konstrukcijo pri različnih intenzitetah vzbujanja

meru zapisa Ulcinj (15,6 cm), kar potrjuje učinkovitost in pravilno izbiro izolacijskega sistema, saj pri projektnih potresnih obremenitvah ostaja konstrukcija elastična. Tudi v primeru 50 % večjega pospeška tal je projektni pomik ležišč malenkostno preoračen samo v primeru vzbujanja z zapisom Ulcinj in Bar. Akcelerogram Ulcinj povzroči tudi največje pomike tal (29 cm) v primeru normiranja pospeškov tal na 0,70 g. Slika 9 prikazuje faktorje duktilnosti za konce gred in stebrov sredinskih okvirjev v ravnini

YZ za akcelerogram Ulcinj (faktor duktilnosti  $\mu$  je definiran kot razmerje dejanske in plastične rotacije upogibne vzmeti:  $\mu \leq 1,0$  pomeni elastično obnašanje). Pri tem izraz »porušitev« označuje stanje mejne nosilnosti prereza, ki nastopi ob doseženi maksimalni deformaciji betona ali armature. Medtem ko se v primeru neizolirane konstrukcije v večini gred in ob vpetju stebrov pojavijo večje poškodbe, ostaja izolirana konstrukcija elastična. V primeru normiranja pospeška tal na 0,525 g in 0,70 g pa se formira manjše

število plastičnih členkov v gredah zgornjih etaž, stebri pa se plastificirajo samo ob vpetju, in to le v primeru potresa Ulcinj.

Na sliki 10 je prikazana primerjava povprečnih etažnih pomikov posameznih etaž za kritičnih pet akceleroگرامov za neizolirano in izolirano konstrukcijo v odvisnosti od intenzitete vzbujanja. Ugotovimo lahko, da so etažni pomiki izolirane konstrukcije bistveno manjši kot v primeru neizolirane konstrukcije. V spodnjih treh etažah so vrednosti etažnih pomikov izolirane konstrukcije za 3 do 4-krat manjše kot v primeru neizolirane konstrukcije, v 4. etaži pa so razlike manjše (faktor 2 do 2,5). Največji etažni pomiki in z njimi posledično največje poškodbe se pojavijo v primeru vzbujanja s pospeškom tal, normiranim na 0,70 g.

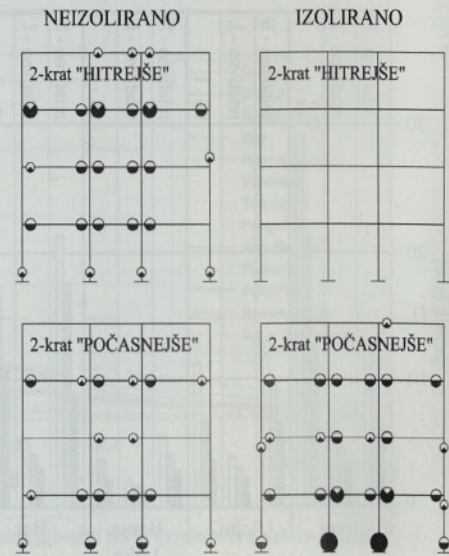
#### 4.5 Ali je potresna izolacija lahko nevarna za obnašanje konstrukcije?

Rezultati dinamičnih analiz časovnega odziva so v splošnem precej občutljivi za podano potresno obtežbo, katere podatki pa so navadno precej nezanesljivi. Odgovornemu in vestnemu projektantu se prav gotovo poraja vprašanje, ali lahko potresna izolacija v primeru bistveno drugačnih frekvenc vzbujanja tudi škodi. Za ta namen smo analizirali odziv neizolirane in izolirane konstrukcije pri dvakrat hitrejšem (krajša prevladujoča perioda) ozi-

roma počasnejšem (daljša prevladujoča perioda) vzbujanju. Na sliki 11 so prikazani faktorji duktilnosti za prirejen akceleroگرام Bar, normiran na projektni pospešek tal (0,35 g). Opazimo, da dvakrat hitrejše vzbujanje ni problematično, medtem ko pa dvakrat počasnejše vzbujanje povzroči potresno izolirani konstrukciji več poškodb kot potresno neizolirani. V tem primeru je lahko vgradnja izbrane potresne izolacije škodljiva! Seveda gre za umeten, nerealističen primer, ki pa vendar kaže, da so lahko dolge periode vzbujanja, ki jih lahko pričakujemo na zelo slabih, mehkih tleh, za potresno izolirano konstrukcijo nevarne. Že začetna nihajna doba izolirane konstrukcije je namreč dolga, ko pa se izolacijske naprave plastificirajo, se lahko še nekajkrat poveča. Zato ima pri analizi potresno izoliranih konstrukcij generiranje obtežbe (spekter odziva) v območju dolgih period pomembno vlogo, žal pa so ravno v tem območju nezanesljivosti podatkov največje. Zato mora inženir pri projektiranju potresno odpornih konstrukcij te pomanjkljivosti modela pokriti z dodatnimi varnostnimi faktorji, ki pa v veliki meri temeljijo na občutku in izkušnjah projektanta (Fischinger, 2001).

#### 4.6 Simulacija obnašanja neizolirane in izolirane konstrukcije

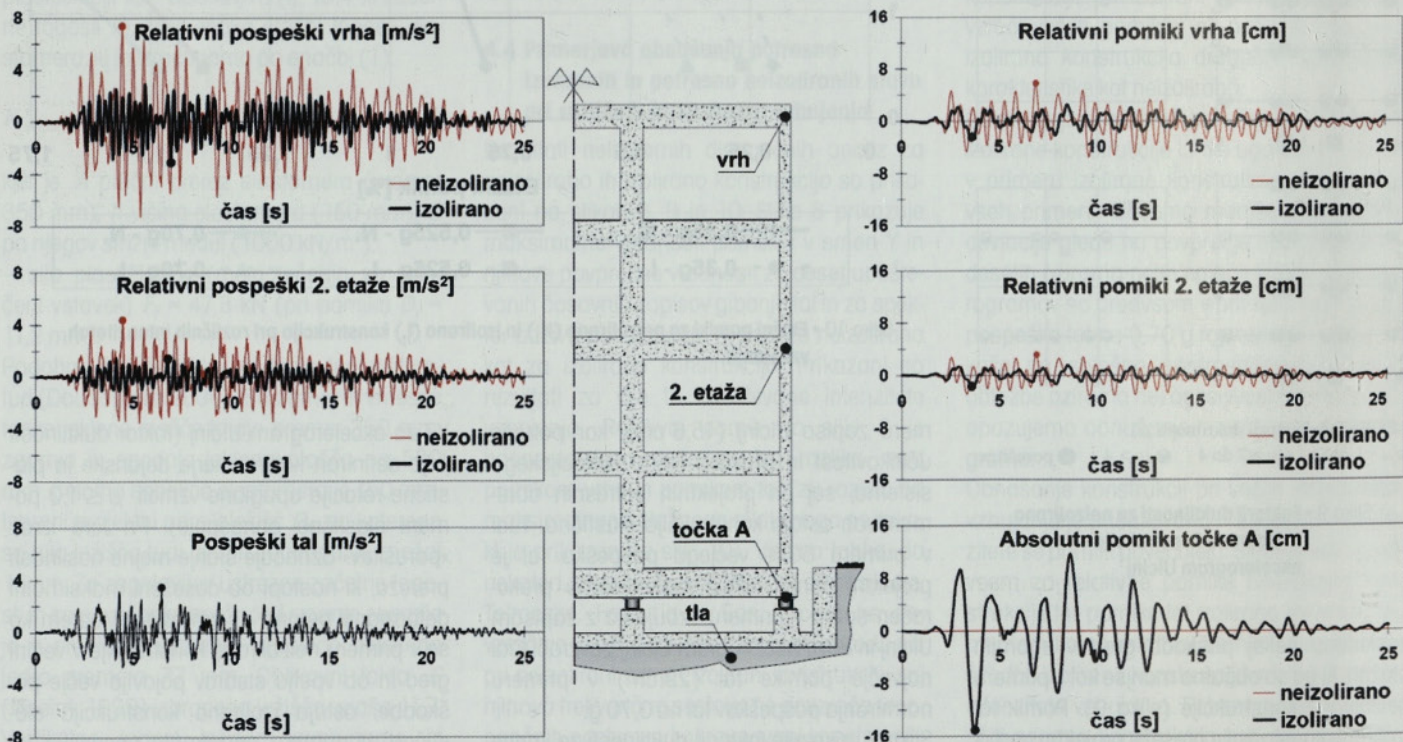
Na sliki 12 je prikazana primerjava časovnih potočkov pospeškov in pomikov izbranih etaž



LEGENDA (faktorji duktilnosti  $\mu$ ):  
 ○  $\mu = 1$  do 2    ●  $\mu = 2$  do 4    ●  $\mu > 4$     ● porušitev

Slika 11 • Faktorji duktilnosti za neizolirano in izolirano konstrukcijo za modificiran akceleroagram Bar z dvakrat krajšo/daljšo prevladujočo periodo vzbujanja

(tla – točka A, 2. etaža in vrh) konstrukcije za neizolirano in izolirano konstrukcijo (akceleroagram Ulcinj, normiran na 0,35 g). Posebej so označene tudi posamezne maksimalne vred-



Slika 12 • Časovni potek pospeškov (levo) in pomikov (desno) za neizolirano in izolirano konstrukcijo za akceleroagram Ulcinj (0,35 g)

nosti. Za vrh in 2. etažo konstrukcije so prikazani relativni pospeški in pomiki zgornje konstrukcije glede na pospeške in pomike vrha izolatorjev (glej točko A na sliki 12). Za točko A pa prikazujemo absolutne pomike, tj. pomike, ki jih prenašajo izolatorji. Če neizolirano konstrukcijo se točka A ujema s tlemi, zato so pospeški neizolirane konstrukcije v točki A enaki pospeškom tal (projektni akcelero-

gram). Če opazujemo relativne pospeške zgornje konstrukcije, lahko ugotovimo, da so največji na vrhu konstrukcije in da se v primeru uporabe potresne izolacije občutno (za faktor  $\sim 2,5$ ) zmanjšajo. Enaka ugotovitev velja tudi za relativne pomike vrha, ob tem da se v primerjavi z neizolirano konstrukcijo bistveno spremeni tudi njihov časovni potek, saj vrh izolirane konstrukcije niha občutno počasne-

je. Do smiselno podobnih ugotovitev pridemo, če opazujemo relativne pospeške oziroma pomike 2. etaže. Pomembno lastnost potresno izoliranih konstrukcij prikazuje časovni potek pomikov točke A, tj. pomikov, ki jih mora prenesti vgrajena potresna izolacija. Vidimo, da so ti pomiki lahko precej veliki in da je njihova frekvenca nihanja bistveno drugačna od frekvence vzbujanja.

## 5 • SKLEP

Izsledki raziskav in nagel porast števila potresno izoliranih objektov dokazujejo, da je potresna izolacija obetavna tehnologija, ki bo morda nekoč postala obvezni sestavni del konstrukcij, podobno kot to postajajo mnogi sistemi aktivne kontrole zaviranja, zdrsa koles in nagibanja v sodobnem avtomobilu. Po svetu danes obstaja razmeroma majhno, vendar ne zanemarljivo število zgrajenih potresno izoliranih stavb (okoli 4500), ki pa nenehno raste. Tovrstna tehnologija je bila v Sloveniji uspešno uporabljena pri gradnji nekaterih večjih mostov in viaduktov avtocestnega križa, prenosa tehnologije v gradnjo konstrukcij stavb pa zaenkrat še ni. Številne tuje izkušnje in aplikacije pa tudi številne raziskave pri nas in v tujini potrjujejo učinkovitost in smotrnost uporabe potresne izolacije. Nadalje se je pri finančni oceni investicije v konstrukcijo pomembno zavedati, da klasično grajenega in potresno izoliranega objekta ni možno neposredno primerjati samo po ceni, saj igra v tem primeru odločilno vlogo bistveno boljše obnašanje izoliranega objekta

pri močnem potresu. Če upoštevamo, da ostane izolirana konstrukcija pri močnem potresu praktično nepoškodovana, je uporaba izolacije tudi iz ekonomskega vidika še kako upravičena. Pomembno je tudi dejstvo, da je odstotek cene gradbene konstrukcije v odstotku končne prodajne cene kvadratnega metra vse nižji, kar pomeni, da postaja popolnoma sprejemljiv tudi bistveno večji strošek za potresno varnejšo konstrukcijo. Kot edini večji problem v praksi se tako ne zdi pomanjkanje ustreznega znanja ali kadra, temveč predvsem praktičnih izkušenj in zavednejših investitorjev, ki jim skrb za dolgoročno varnost stavbe ni tuja.

Tudi v članku prikazani rezultati analiz potrjujejo ustreznost in učinkovitost potresne izolacije, saj pri vseh upoštevanih potresih izolirana konstrukcija ostaja v elastičnem območju, medtem ko se neizolirana konstrukcija močno poškoduje (faktorji duktilnosti do 4). Celo pri potresih, ki so močnejši od projektne potresa, potresna izolacija v precejšnji meri ščiti zgornjo konstrukcijo, saj pride pri

analizirani konstrukciji le do manjših poškodb posameznih gred v 2. in 3. etaži. V primerih takšnih obremenitev bi bile poškodbe neizolirane konstrukcije precej večje, konstrukcija pa bi se nepopravljivo poškodovala ali celo porušila (faktorji duktilnosti nad 4). Ugotovimo lahko, da sistem potresne izolacije v primerjavi s klasično neizolirano konstrukcijo bistveno povečuje njeno varnost, ne samo pri projektirani potresni obtežbi (kot to zahtevajo predpisi), temveč tudi pri močnejših potresnih obtežbah. Analiza vpliva spreminjanja frekvenca vzbujanja na obnašanje potresno izoliranih stavb kaže, da lahko za zgornjo konstrukcijo postanejo problematične posebej dolge periode vzbujanja, ki so lahko najbolj verjetne na slabih, mehkih tleh. Prikazani primer sicer ni realističen, kaže pa, da je potresna izolacija tehnologija, ki jo je treba projektirati z določeno mero previdnosti.

Malo raziskano področje ostaja vpliv potresne izolacije na tlorisno neregularne konstrukcije, ki so potresno še precej bolj ranljive. Zato bo naše nadaljnje raziskovalno delo usmerjeno predvsem v raziskave obnašanja potresno izoliranih neregularnih in nesimetričnih konstrukcij in iskanje novih možnosti za svobodnejše projektiranje potresno varnih stavb.

## 6 • LITERATURA

Citirana in splošna literatura:

- ASSISI, ASSISI 10th world conference on seismic isolation, energy dissipation and active vibrations control of structures, 28–31 May 2007, Istanbul : abstracts book: Dynamic isolation systems, 2007.
- Doudoumis, N.I., Kotanidis, C., Doudoumis, I.N., A comparative study on static push-over and time-history analysis methods in base isolated buildings, Proc. 1st European conference on earthquake engineering and seismology, Geneva, paper number: 420, 2006.
- Eggert, H., Kauschke, W., Structural bearings, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2002.
- Faella, G., Kilar, V., Asymmetric multistorey R/C frame structures: push-over versus nonlinear dynamic analysis, Proc. 11th European conference on earthquake engineering, Paris, Balkema, Rotterdam, 1998.
- Fischinger, M., Isaković, T., Potresna izolacija pri novogradnjah in sanacijah AC mostov (končno poročilo), Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2001.
- Isaković, T., Fischinger, M., Potresna izolacija mostov, Gradbenik, 7(10): 35–39, 2003.

- Isaković, T., Fischinger, M., Applicability of variable stiffness seismic isolators based on magnetically controlled elastomer, Improvement of buildings' structural quality by new technologies : proceedings of the final conference of COST action C12, 20–22 January 2005, Innsbruck, Austria, str. 677–682, Balkema, 2005.
- Kelly, J.M., Earthquake-resistant design with rubber: second edition, Springer-Verlag, London, 1997.
- Kilar, V., Fajfar, P., On the applicability of pushover analysis to the seismic performance evaluation of asymmetric buildings, European earthquake engineering, 15(1): 20–31, 2001.
- Li, H.-N., Wu, X.-X., Limitations if height-to-width ratio for base-isolated buildings under earthquake, The structural design of tall and special buildings, 15: 277–287, 2006.
- Martelli, A., Forni, M., Seismic isolation of civil buildings in Europe, Progress in structural engineering and materials, 1(3): 286–294, 1998.
- Martelli, A., Modern seismic protection systems for civil and industrial structures, SAMCO final report 2006 (F11 selected paper), (dosegljivo na: <http://www.samco.org/>, <20. 9. 2007>), 2006.
- Melkumyan, M., Hovhannisyann, H., New approaches in analysis and design of base isolated multistory multifunctional buildings. Proc. 1st European conference on earthquake engineering and seismology, Geneva, paper number: 194, 2006.
- Naeim, F., Kelly, J.M., Design of seismic isolated structures: from theory to practice, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1999.
- Pan, P., Zamfirescu, D., Nakashima, M., Nakayasu, N., Kashiwa, H., Base-isolated design practice in Japan: introduction to the post-Kobe approach, Journal of earthquake engineering, 9 (1): 147–171, 2005.
- Paulay, T., Priestley, M.J.N., Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.
- SAP2000, Three dimensional static and dynamic finite element analysis and design of structures, Computers and structures, Inc., Berkeley, California, 2001.
- Skinner, R.I., Robinson, W.H., McVerry, G.H., An introduction to seismic isolation, John Wiley & Sons, Chicester, England, 1993.
- Zevnik, J., Fischinger, M., Isaković, T., Nova inteligentna naprava za potresno izolacijo konstrukcij, Zbornik 28. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 19.–20. oktober 2006, str. 67–74, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, Ljubljana, 2006.

#### Drugi viri in viri slik:

- Constantinou, M.C., Friction pendulum double concave bearing (technical report), University of Buffalo, State university of New York, Buffalo, NY, 2004.
- Di Sarno, L., Elnashai, A.S., Seismic retrofit of steel and composite building structures, Mid-America earthquake center, Civil and environmental engineering department, University of Illinois at Urbana-Champaign, (dosegljivo na: <http://mae.ce.uiuc.edu/publications/>, <20. 9. 2007>), 2002.
- Forni, M., Aspetti esecutivi relativi all'installazione di isolatori sismici in edifici nuovi; predstavitev na seminarju: Nuovi sistemi di protezione sismica: progetto architettonico e configurazioni strutturali, Pinerolo (TO), april 2007, (dosegljivo na: <http://www.assisi-antiseismicssystem.org/>, <20. 9. 2007>), 2007.
- <http://www.taiwanpillar.com.tw/>, <20. 9. 2007>.
- Martelli, A., Edifici con isolamento sismico, dissipazione di energia ed altri moderni sistemi antisismici in Italia e nel mondo; predstavitev na seminarju: Nuovi sistemi di protezione sismica: progetto architettonico e configurazioni strutturali, Pinerolo (TO), april 2007, (dosegljivo na: <http://www.assisi-antiseismicssystem.org/>, <20. 9. 2007>), 2007.
- Maurer Söhne, Structural Protection System, april 2007, (CD-ROM), München, 2007.
- Yang, G., Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation: modeling, testing and control; (dissertation), Graduate school of the University of Notre Dame, Indiana, (dosegljivo na: [http://cee.uiuc.edu/sstl/gyang2/gyang2\\_thesis.htm](http://cee.uiuc.edu/sstl/gyang2/gyang2_thesis.htm), <20. 9. 2007>), 2001.



# STROŠKOVNO OPTIMIRANJE SOVPREŽNIH KONSTRUKCIJ IZ BETONA IN JEKLA – 1. DEL: ANALIZA LASTNIH IZDELAVNIH STROŠKOV

## COST OPTIMIZATION OF THE CONCRETE-STEEL COMPOSITE STRUCTURES – PART 1: SELF- MANUFACTURING COST ANALYSIS

doc. dr. Uroš Klanšek, univ. dipl. gosp. inž.  
red. prof. dr. Stojan Kravanja, univ. dipl. inž. grad.  
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,  
Smetanova 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek  
UDK 338.585 : 624.01

**Povzetek** | V članku je predstavljeno stroškovno optimiranje sovprežnih konstrukcij iz betona in jekla. Prvi del v seriji dveh člankov predstavlja analizo lastnih izdelavnih stroškov za sovprežne konstrukcije. Obravnavani lastni izdelavni stroški obsegajo ocenjene stroške materialov, porabe električne energije in dela. Podrobno so predstavljeni materialni stroški konstrukcijskega jekla, betona, armature, strižnih moznikov, elektrod, barv antikorozijske, protipožarne in končne zaščite, opažnih plošč in rezalnih plinov. Predstavljeni so stroški porabe električne energije za žaganje jeklenih profilov, brušenje robov, varjenje, varjenje moznikov in vibriranje betona. Definirani so stroški dela za rezanje jeklenih konstrukcijskih polizdelkov, brušenje robov, pripravo, sestavitev in pritrjevanje elementov za varjenje, ročno varjenje, polavtomatsko varjenje valjčnih moznikov, pripravo in zaščito jeklene površine, rezanje, postavitve in vezanje armature, betoniranje, konsolidacijo in nego betona. Izrazi za ocenitev stroškov so podani v odprti obliki, kar omogoča njihovo uporabo v različnih ekonomskih in tehnoloških pogojih. Z računskim primerom ocenitve lastnih izdelavnih stroškov za sovprežni stropni sistem z varjenimi I nosilci je predstavljena uporabnost predlaganega pristopa. Na podlagi v prvem članku definiranih lastnih izdelavnih stroškov je v drugem članku predstavljeno stroškovno optimiranje sovprežnih paličnih konstrukcij.

**Summary** | This paper presents the cost optimization of the concrete-steel composite structures. Part 1 of this two-part series of papers presents the self-manufacturing cost analysis for composite structures. The considered self-manufacturing costs include the estimated material, power consumption and labour costs. The material costs of structural steel, concrete, reinforcement, shear connectors, electrodes, anti-corrosion, fire protection and top coat painting, formwork floor-slab panels, and gas consumption are presented in detail. The power consumption costs comprise the costs of sawing the steel sections, edge grinding, drilling, welding, stud welding, and vibrating of concrete. The labour costs presented define the costs of metal cutting, edge grinding, preparation, assembling and tacking, welding, welding of shear connectors, steel surface preparation and protection, cutting, placing and connecting the reinforcement, concreting, consolidating, and curing of concrete. The proposed cost expressions are given in the open form to

be used for cost estimation in different economic and technological conditions. A numerical example of the estimation of the self-manufacturing costs for a composite I beam floor system shows the suitability of the proposed approach.

On the basis of the defined self-manufacturing costs, introduced in Part 1, the cost optimization of the composite trusses is discussed in Part 2.

## 1 • UVOD

Eden od glavnih izzivov gradbeništva v pogojih tržnega gospodarstva in medsebojnega konkuriranja podjetij v gradbeni panogi je dimenzionirati in graditi ekonomsko konkurenčne konstrukcije z ustrežno nosilnostjo, ki bo zadovoljila potrebe investitorja ter vse zahteve za varnost, trajnost, vzdrževanje, ekološko sprejemljivost, estetski videz in arhitektonsko ujemanje z okoljem. Zahteve za doseganjem stroškovno najugodnejših konstrukcijskih rešitev povečujejo potrebe po natančni oceni stroškov in stroškovnem optimiranju konstrukcij. Stroškovna analiza celotnih stroškov konstrukcije obsega ocenitev stroškov projektiranja, lastnih izdelavnih stroškov, stroškov transporta, stroškov dviga, stroškov montaže, posrednih stroškov, stroškov amortizacije in stroškov vzdrževanja. Čeprav mora biti za določitev prodajne cene konstrukcije opravljena ocenitev vseh omenjenih stroškov, je ocenitev lastnih izdelavnih stroškov pogosto tista, ki najbolj odraža stroškovno naravo konstrukcijske rešitve.

V dosedaj objavljeni literaturi na področju ocenitve stroškov konstrukcij zasledimo dela avtorjev, ki predstavljajo različne tehnike in smernice za posamezne stroškovne postavke v kovinskopredelovalni in gradbeni industriji. Creese, Adithan in Pabla (Creese, 1992) so obravnavali tehnike ocenitve stroškov v kovinskopredelovalni industriji s poudarkom na proizvodnih procesih rezanja, varjenja, litja in

plastičnega oblikovanja kovin. Cary (Cary 1995, 2002) je predlagal nekaj enačb za izračun stroškov varjenja. Jármái in Farkas (Jármái, 1999) sta predstavila problematiko stroškovnega optimiranja varjenih jeklenih konstrukcij, kjer sta podrobneje obravnavala proizvodne čase za procese varjenja, ravnanja jeklenih plošč, priprave in barvanja jeklenih površin, plinskega rezanja jeklenih plošč in brušenja. V nadaljnjih raziskavah je Jármái (Jármái, 2003) obravnaval proizvodne čase in postopke za obdelavo zvarov, za ročno žaganje ter za brušenje jekla. Pavlovčič, Krajnc in Beg (Pavlovčič, 2004) so predstavili podrobni pristop k oblikovanju stroškovne namenske funkcije za optimiranje jeklenih okvirjev, kjer so obravnavali stroške procesov varjenja, rezanja jeklenih elementov, priprave in barvanja jeklenih površin, ravnanja pasnic elementov, izdelave spojev nosilcev in stebrov, transporta in dviga konstrukcijskih elementov. Schreve, Schuster in Basson (Schreve, 1999) so predstavili proizvodne čase za izdelavo različnih jeklenih polizdelkov s poudarkom na procesu sestavljanja obdelovancev in spenjalnega varjenja. Ramirez in Touran (Ramirez, 1991) sta obravnavala učinkovitost delovne sile v gradbeni industriji, upoštevajoč pogoje dela in vodenja. Tizani in sodelavci (Tizani, 1996) so razvili model za ocenitev proizvodnih stroškov jeklenih paličij na podlagi objekt- no usmerjene metodologije oz. *Object-orient-*

*ed methodology*. Bučar (Bučar, 1999) je obravnaval proizvodne čase za gradbena dela, kjer predlaga normativne čase za izdelavo armiranobetonskih konstrukcij v stavbah. Singh (Singh, 1990) je predstavil model za približno ocenitev stroškov armiranobetonskih nosilcev in plošč pri gradnji večetažnih stavb. Behr, Cundy in Goodspeed (Behr, 1990) so predstavili izsledke študij metod za ocenitev stroškov konstrukcije za lesene, jeklene in prednapete betonske mostove. Kravanja in sodelavci (Kravanja, 1998, 2002) so izvedli ocenitev stroškov in stroškovno optimiranje hidravličnih jeklenih zapornic.

V seriji dveh člankov je predstavljeno stroškovno optimiranje sovprednih konstrukcij iz betona in jekla. Prvi del predstavlja analizo lastnih izdelavnih stroškov za sovpredne konstrukcije, več glej (Klanšek, 2006). Namen prvega članka je predlagati izraze za ocenitev lastnih izdelavnih stroškov materialov, porabe električne energije in dela, ki so uporabno orodje za oblikovanje stroškovnih namenskih funkcij za optimiranje sovprednih konstrukcij. Stroški projektiranja, transporta, dviga, montaže, amortizacije in vzdrževanja konstrukcije ter posredni stroški niso posebej obravnavani v okviru članka. Z računskim primerom ocenitve lastnih izdelavnih stroškov za sovpredni stropni sistem z varjenimi / nosilci je predstavljena uporabnost predlaganega pristopa.

Na podlagi v prvem članku definiranih lastnih izdelavnih stroškov je v drugem članku predstavljen stroškovno optimiranje sovprednih paličnih konstrukcij.

## 2 • STROŠKI MATERIALA

### 2.1 Stroški materiala konstrukcijskega jekla, betona in armature

Stroški materiala konstrukcijskega jekla, betona in armature se lahko ocenijo z uporabo enačbe:

$$C_{M,s,c,r} = c_{M,s} \cdot \rho_s \cdot V_s + c_{M,c} \cdot V_c + c_{M,r} \cdot \rho_r \cdot V_r \quad (1)$$

kjer so  $c_{M,s}$  (€/kg),  $c_{M,c}$  (€/m<sup>3</sup>) in  $c_{M,r}$  (€/kg) cene konstrukcijskega jekla, betona in armature;  $\rho_s$  je gostota jekla 7850 kg/m<sup>3</sup>;  $V_s$  (m<sup>3</sup>),  $V_c$  (m<sup>3</sup>) in  $V_r$  (m<sup>3</sup>) so volumni konstrukcijskega jekla, betona in armature.

### 2.2 Stroški materiala moznikov

Stroške materiala moznikov lahko ocenimo z naslednjim izrazom:

$$C_{M,sc} = c_{M,sc} \cdot n_{sc} \quad (2)$$

kjer  $c_{M,sc}$  (€/moznik) in  $n_{sc}$  označujeta ceno in število moznikov.

### 2.3 Stroški materiala porabe elektrod

Stroške materiala porabe elektrod lahko ocenimo z izrazom, ki so ga podali Creese, Adithan in Pabla (Creese, 1992):

$$C_{M,e} = c_{M,e} \cdot A_w \times 10^{-6} \cdot \rho_s \cdot \frac{1}{EMY} \cdot I_w \quad (3)$$

kjer je  $c_{M,e}$  (€/kg) cena elektrod;  $A_w$  (mm<sup>2</sup>) je površina prečnega prereza zvara;  $EMY$  je izkoristek elektrode;  $l_w$  (m) je dolžina zvara. Izkoristek elektrode je odvisen od intezitete škropljenja, oplaščenja in ostanka žlindre. Vrednosti  $EMY$  za različne tehnologije varjenja je predlagal Cary (Cary, 2002): karakteristična vrednost za obločno varjenje  $EMY = 0,6$ .

## 2.4 Stroški materiala barv antikorozijskega, protipožarnega in končnega premaza

Oceniti natančno potrebno količino barve je težavno opravilo, ker je količina izgubljene barve zelo odvisna od tehnike barvanja in lokalnih delovnih razmer. Nekaj smernic za ocenitev potrebne količine barve je podanih od International Protective Coatings (International Protective Coatings, 2004). Stroški materiala barv antikorozijskega, protipožarnega in končnega zaščitnega premaza tako lahko ocenimo z enačbo:

$$C_{M,ac,fp,tc} = (c_{M,ac} + c_{M,fp} + c_{M,tc}) \cdot (1 + k_p \cdot k_{sur} \cdot k_{wc}) \cdot A_{ss} \quad (4)$$

kjer so  $c_{M,ac}$  (€/m<sup>2</sup>),  $c_{M,fp}$  (€/m<sup>2</sup>) in  $c_{M,tc}$  (€/m<sup>2</sup>) cene antikorozijskega, protipožarnega in končnega zaščitnega premaza;  $k_p$  je faktor, ki upošteva izgubo barve glede na izbrano tehniko barvanja (za izkušene in kvalificiranega delavca:  $k_p = 0,20$  za brezračno in zračno brizganje barve,  $k_p = 0,05$  za barvanje s čopičem ali z valjčkom);  $k_{sur}$  je faktor, ki upošteva izgubo barve zaradi zahtevnosti oblike površine konstrukcije za barvanje ( $k_{sur} = 1,00$  za konstrukcije z velikimi in ravnimi površinami za barvanje,  $k_{sur} = 2,00-3,00$  za konstrukcije z malimi površinami za barvanje);  $k_{wc}$  je faktor, ki upošteva izgubo barve zaradi vremenskih razmer v okolju, kjer se konstrukcija barva ( $k_{wc} = 1,00$  za barvanje s čopičem ali z valjčkom,  $k_{wc} = 1,05$  za nanos barve z brizganjem v zaprtem prostoru,  $k_{wc} = 1,10$  za nanos barve z brizganjem zunaj, na odprtem prostoru v brezvetrju,  $k_{wc} = 1,20$  za nanos barve z brizganjem zunaj, na odprtem prostoru, izpostavljenemu vetru);  $A_{ss}$  (m<sup>2</sup>) je površina jeklene konstrukcije za barvanje.

## 2.5 Stroški materiala opažnih plošč

Sodobni montažni opažni sistemi za stropne konstrukcije so sestavljeni iz prefabriciranih opažnih plošč in podpornega sistema: npr. nosilcev, podpornikov ali podpornih stolpov in veznih elementov. Upoštevajoč dolgo življenj-

sko dobo oz. veliko število ciklov uporabe se stroški materiala podpornega sistema lahko zanemarijo. Tako večino materialnih stroškov opaževanja predstavljajo stroški materiala opažnih plošč. Stroške materiala opažnih plošč lahko ocenimo s pomočjo naslednjega izraza:

$$C_{M,f} = c_{M,f} \cdot \frac{1}{n_{uc}} \cdot A_{cs} \quad (5)$$

kjer je  $c_{M,f}$  (€/m<sup>2</sup>) cena opažnih plošč;  $n_{uc}$  število ciklov uporabe opažnih plošč in  $A_{cs}$  (m<sup>2</sup>) površina betonske plošče. Število ciklov uporabe opažnih plošč  $n_{uc}$  je odvisno od kvalitete, načina uporabe, čiščenja, preverjanja poškodb in servisiranja opažnih plošč. Zaradi tega se število ciklov uporabe opažnih plošč zelo spreminja od podjetja do podjetja. Na podlagi dodatnih povpraševanj na terenu se je v grobem ugotovilo, da  $n_{uc}$  lahko znaša nekje med 10 in 100.

## 2.6 Stroški materiala porabe plinov za rezanje jeklenih pločevin

Stroški materiala porabe plinov za rezanje jeklenih pločevin se lahko ocenijo z naslednjim izrazom:

$$C_{M,c,gas} = c_{M,gas} \cdot k_{csr} \cdot Q_{gas} \cdot T_{c,gas,tech} \cdot l_c \quad (6)$$

kjer  $c_{M,gas}$  (€/m<sup>3</sup>) je cena plina;  $k_{csr}$  je faktor redukcije hitrosti rezanja ( $k_{csr} = 1,00$  za pravokotni rez,  $k_{csr} = 1,25$  za poševni rez

pod kotom 30°,  $k_{csr} = 1,45$  za poševni rez pod kotom 45°);  $Q_{gas}$  (m<sup>3</sup>/h) je poraba plina;  $T_{c,gas,tech}$  (h/m) je čas rezanja pločevin za izbrano tehnologijo rezanja in  $l_c$  (m) je dolžina rezanja.

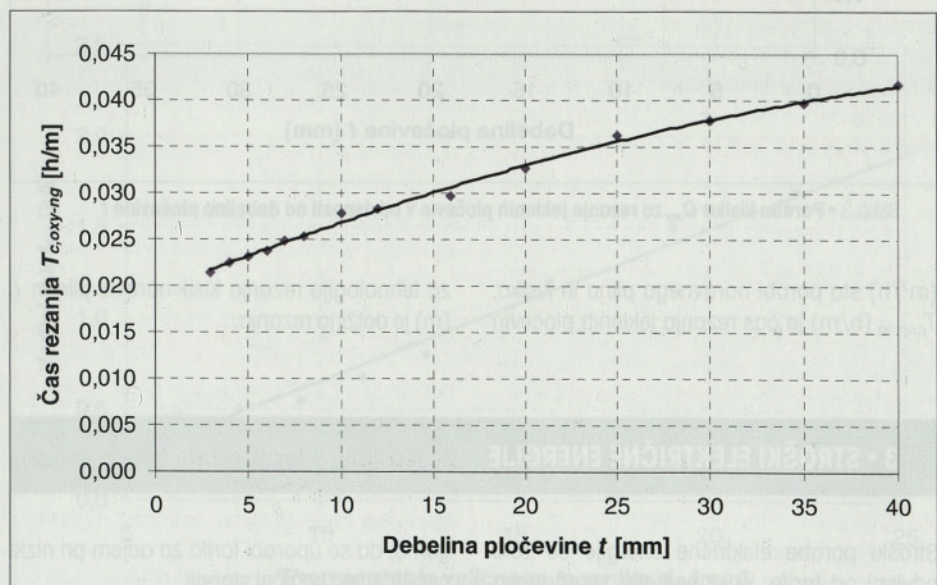
Jármai in Farkas (Jármai, 1999) sta v svojem prispevku predstavila čase rezanja za tehnologije rezanja z acetylenom, s stabilizirano mešanico plinov in s propanom. V članku podrobneje predstavljamo porabo plinov in čas rezanja jeklenih pločevin za tehnologijo rezanja kisik-naravni plin (*Oxygen-Natural Gas Cutting Technology*). Predstavljena tehnologija je stroškovno konkurenčna v primerih, ko je proizvodni obrat priključen na plinsko omrežje.

Stroški materiala porabe plinov za rezanje jeklenih pločevin s tehnologijo kisik-naravni plin obsegajo stroške porabe naravnega plina  $C_{M,c,ng}$  (€) in kisika  $C_{M,c,oxy}$  (€). Poraba kisika obsega porabo ogrevalnega in rezalnega kisika. Glede na enačbo (6) lahko stroške materiala porabe naravnega plina in kisika definiramo z izrazoma:

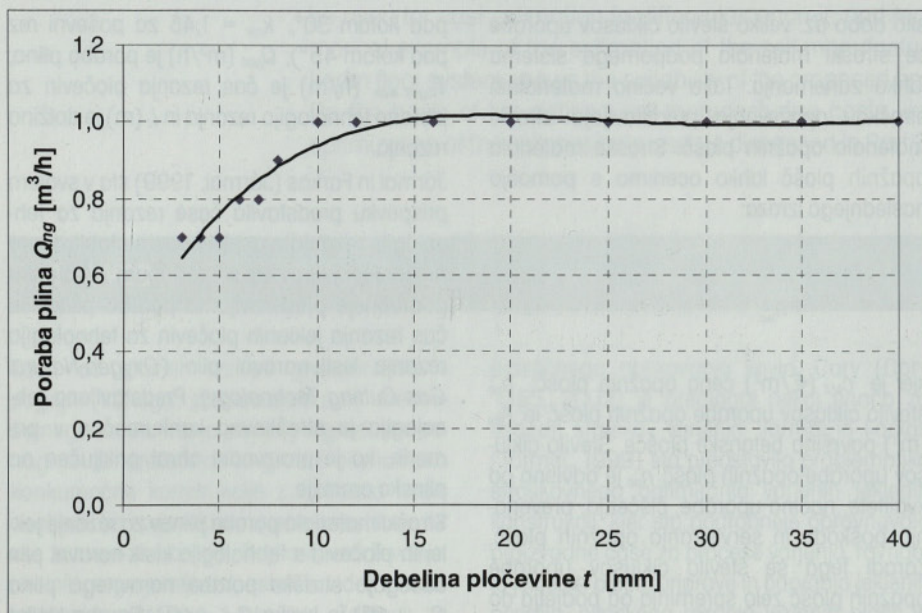
$$C_{M,c,ng} = c_{M,ng} \cdot k_{csr} \cdot Q_{ng} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_c \quad (7)$$

$$C_{M,c,oxy} = c_{M,oxy} \cdot k_{csr} \cdot Q_{oxy} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_c \quad (8)$$

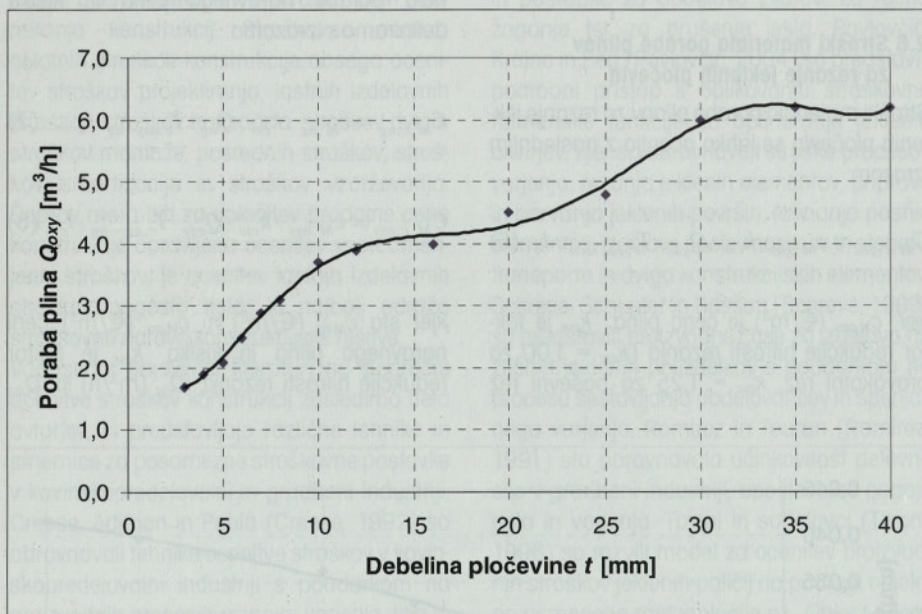
kjer sta  $c_{M,ng}$  (€/m<sup>3</sup>) in  $c_{M,oxy}$  (€/m<sup>3</sup>) ceni naravnega plina in kisika  $k_{csr}$  je faktor redukcije hitrosti rezanja;  $Q_{ng}$  (m<sup>3</sup>/h) in  $Q_{oxy}$



Slika 1 • Čas rezanja jeklenih pločevin za tehnologijo rezanja kisik-naravni plin  $T_{c,oxy-ng}$  v odvisnosti od debeline pločevine  $t$



Slika 2 • Poraba naravnega plina  $Q_{ng}$  za rezanje jeklenih pločevin v odvisnosti od debeline pločevine  $t$



Slika 3 • Poraba kisika  $Q_{oxy}$  za rezanje jeklenih pločevin v odvisnosti od debeline pločevine  $t$

(m³/h) sta porabi naravnega plina in kisika;  $T_{c, oxy-ng}$  (h/m) je čas rezanja jeklenih pločevin

za tehnologijo rezanja kisik-naravni plin in  $l_c$  (m) je dolžina rezanja.

### 3 • STROŠKI ELEKTRIČNE ENERGIJE

Stroški porabe električne energije so zelo odvisni od tarife, ki jo podjetju zaračunava javni distributer električne energije. Za potrebe ocenitve stroškov električne energije predla-

gamo, da se uporabi tarifa za odjem pri nizki napetosti po konični stopnji.

Večino strojev, ki se uporabljajo v kovinsko-predelovalni industriji poganjajo indukcijski

čas rezanja jeklenih pločevin za tehnologijo rezanja kisik-naravni plin  $T_{c, oxy-ng}$  je predstavljen na sliki 1 v obliki aproksimacijske funkcije v odvisnosti od debeline pločevine  $t$ . Aproksimacijska funkcija je bila razvita za Messerjevo plamensko rezalno šobo GRICUT 1230-PMYF (Messer Cutting & Welding GmbH, 2005) za debelino pločevine med 3 in 40 mm:

$$T_{c, oxy-ng} = a_2 \cdot t^2 + a_1 \cdot t + a_0 \quad (9)$$

kjer je  $T_{c, oxy-ng}$  (h/m) čas rezanja jeklenih pločevin za tehnologijo rezanja kisik-naravni plin;  $a_i$  so koeficienti polinomne aproksimacijske funkcije za čas rezanja jeklenih pločevin za tehnologijo rezanja kisik-naravni plin:  $a_2 = -6,3961 \times 10^{-6}$ ,  $a_1 = 8,1248 \times 10^{-4}$  in  $a_0 = 1,9300 \times 10^{-2}$ ;  $t$  (mm) je debelina pločevine.

Porabi naravnega plina  $Q_{ng}$  in kisika  $Q_{oxy}$  sta predstavljeni v odvisnosti od debeline pločevine na slikah 2 in 3 za debelino pločevine  $t$  med 3 in 40 mm. Za rezanje jeklenih pločevin s tehnologijo rezanja kisik-naravni plin in podano rezalno šobo sta aproksimacijski funkciji za porabo naravnega plina ter kisika podani z naslednjima enačbama:

$$Q_{ng} = b_4 \cdot t^4 + b_3 \cdot t^3 + b_2 \cdot t^2 + b_1 \cdot t + b_0 \quad (10)$$

$$Q_{oxy} = c_6 \cdot t^6 + c_5 \cdot t^5 + c_4 \cdot t^4 + c_3 \cdot t^3 + c_2 \cdot t^2 + c_1 \cdot t + c_0 \quad (11)$$

kjer  $Q_{ng}$  (m³/h) predstavlja porabo naravnega plina;  $b_i$  so koeficienti polinomne aproksimacijske funkcije za porabo naravnega plina:  $b_4 = -8,6803 \times 10^{-7}$ ,  $b_3 = 1,0969 \times 10^{-4}$ ,  $b_2 = -4,9262 \times 10^{-3}$ ,  $b_1 = 9,1898 \times 10^{-2}$  in  $b_0 = 4,1176 \times 10^{-1}$ ;  $Q_{oxy}$  (m³/h) je poraba kisika;  $c_i$  so koeficienti polinomne aproksimacijske funkcije za porabo kisika:  $c_6 = 1,4266 \times 10^{-7}$ ,  $c_5 = -1,8327 \times 10^{-5}$ ,  $c_4 = 8,8852 \times 10^{-4}$ ,  $c_3 = -2,0047 \times 10^{-2}$ ,  $c_2 = 2,0634 \times 10^{-1}$ ,  $c_1 = -6,3661 \times 10^{-1}$  in  $c_0 = 2,2086$ ;  $t$  (mm) je debelina pločevine.

motorji. Pri tem se izkoristki električne moči indukcijskih motorjev različnih proizvajalcev gibljejo nekje med 75 in 90 %. Bolj učinkoviti indukcijski motorji lahko dosežejo tudi 95 % izkoriščenost električne moči. Za potrebe ocenitve stroškov porabe električne energije pri strojni obdelavi kovin predlagamo uporabo povprečnega izkori-

stka električne moči  $\eta = 0,85$  kot tipično vrednost.

### 3.1 Stroški porabe električne energije za žaganje jeklenih profilov

Stroški porabe električne energije za žaganje standardnih jeklenih profilov z električno žago se lahko ocenijo z uporabo naslednjega izraza:

$$C_{P,c,hs} = c_P \cdot \frac{P_{hs}}{\eta_{hs}} \cdot k_{am} \cdot T_{c,hs} \cdot h \quad (12)$$

kjer je  $c_P$  (€/kWh) cena električne energije;  $P_{hs}$  (kW) je moč električne žage;  $\eta_{hs}$  je izkoristek električne moči električne žage (predlagana vrednost  $\eta_{hs} = 0,85$ ) in  $k_{am}$  je faktor dopustnega odstopanja pri ocenjenem tehnološkem času za strojno obdelavo. Tipično vrednost za dopustno odstopanje pri ocenjenem tehnološkem času za strojno obdelavo kovin  $k_{am} = 1,09$  so predlagali Creese, Adithan in Pabla (Creese, 1992).  $T_{c,hs}$  (h/m) je čas žaganja profilov z električno žago in  $h$  (m) je višina standardnega jeklenega profila. V podjetju Metalna (Kravanja, 1995, 1998, 2002) so ocenili čas žaganja standardnih odprtih profilov višine do 700 mm  $T_{c,hs} = 1,337$  h/m. Ocenjene čase žaganja za standardne zaprte profile lahko zasledimo v prispevku (Jármai, 2003).

### 3.2 Stroški porabe električne energije za brušenje robov jeklenih pločevin in profilov

Robovi jeklenih profilov in pločevin, ki jih varimo, morajo biti čisti, gladki, enakomerno obdelani, brez razpok in rje. Stroški porabe električne energije za brušenje robov jeklenih pločevin in profilov se lahko izračunajo z uporabo naslednje formule:

$$C_{P,gm} = c_P \cdot \frac{P_{gm}}{\eta_{gm}} \cdot k_{am} \cdot T_g \cdot l_g \quad (13)$$

kjer je  $c_P$  (€/kWh) cena električne energije;  $P_{gm}$  (kW) je moč električnega brusilnika;  $\eta_{gm}$  je izkoristek električne moči električnega brusilnika (predlagana vrednost  $\eta_{gm} = 0,85$ ) in  $k_{am}$  je faktor dopustnega odstopanja pri ocenjenem tehnološkem času za strojno obdelavo (tipična vrednost  $k_{am} = 1,09$ ).  $T_g$  (h/m) je čas brušenja robov z električnim brusilnikom in  $l_g$  (m) je dolžina brušenja. V podjetju Metalna so na podlagi meritev in raziskav ocenili čase brušenja robov standardnih jeklenih pločevin in odprtih profilov, in sicer: 22,2

$\times 10^{-3}$  h/m,  $33,3 \times 10^{-3}$  h/m,  $44,4 \times 10^{-3}$  h/m in  $55,6 \times 10^{-3}$  h/m za debeline pločevin 10, 20, 30 in 40 mm. Ocenjene čase brušenja robov za standardne zaprte profile lahko zasledimo v prispevku (Jármai, 2003).

### 3.3 Stroški porabe električne energije za varjenje jeklenih pločevin in profilov

Stroški porabe električne energije za varjenje jeklenih polizdelkov se lahko ocenijo po enačbi, ki so jo predlagali Creese, Adithan in Pabla (Creese, 1992):

$$C_{P,w} = c_P \cdot \frac{I \cdot U \cdot A_w \times 10^{-6} \cdot \rho_s \cdot l_w}{\eta_w \cdot DR} \quad (14)$$

kjer je  $c_P$  (€/kWh) cena električne energije;  $I$  (kA) je jakost varilnega električnega toka;  $U$  (V) je varilna napetost;  $A_w$  (mm<sup>2</sup>) je površina prečnega prereza zvara;  $\rho_s$  je izkoristek električne moči varilnega stroja;  $DR$  (kg/h) je povprečna hitrost vgrajevanja dodatne mase kovine v zvar in  $l_w$  (m) je dolžina zvara. Večina obločnih varilnih strojev ima približno 90 % izkoristek električne moči (predlagana vrednost  $\eta_w = 0,9$ ), glej (Creese, 1992). V podjetju Metalna so na podlagi lastnih meritev in raziskav ocenili, da je pri varilnem toku 230 A in varilni napetosti 25 V povprečna hitrost vgrajevanja dodatne mase kovine v zvar približno 3,7 kg/h. Creese, Adithan in Pabla (Creese, 1992) so predlagali naslednjo formulo za izračun povprečne hitrosti vgrajevanja dodatne mase kovine v zvar:

$$DR = 15 \cdot I - 0,77 \quad (15)$$

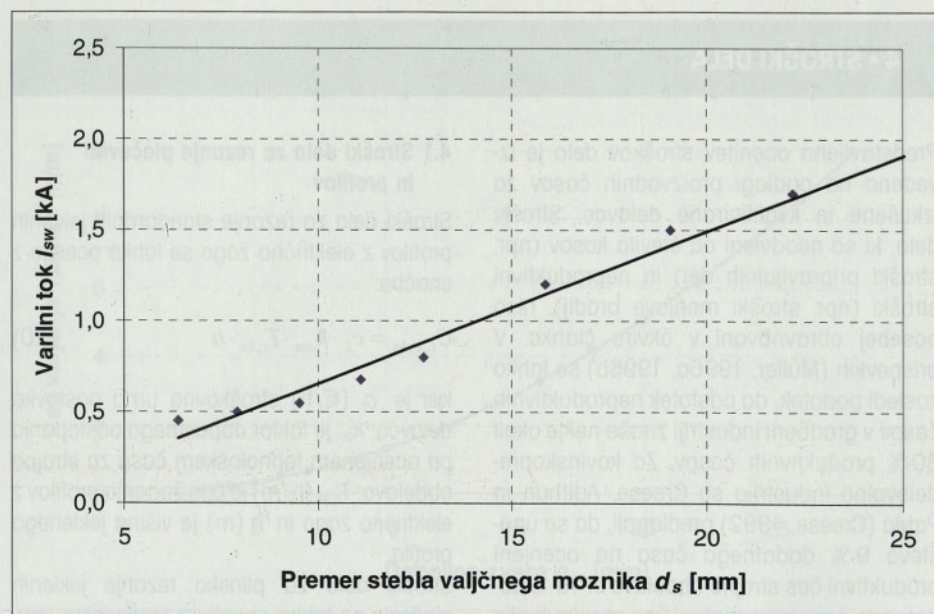
### 3.4 Stroški porabe električne energije za varjenje moznikov

Polavtomatsko obločno varjenje moznikov je ena od najpogosteje uporabljenih metod pri-trjevanja valjčnih moznikov na jeklene konstrukcijske elemente. Stroški porabe električne energije za polavtomatsko obločno varjenje valjčnih moznikov se lahko ocenijo z naslednjim izrazom:

$$C_{P,sw} = c_P \cdot \frac{I_{sw} \cdot U_{sw} \cdot T_{sw} \cdot n_{sc}}{\eta_w \cdot 3600} \quad (16)$$

kjer je  $c_P$  (€/kWh) cena električne energije;  $I_{sw}$  (kA),  $U_{sw}$  (V) in  $T_{sw}$  (s) so jakost varilnega električnega toka, varilna napetost in čas varjenja za polavtomatsko obločno varjenje valjčnih moznikov;  $\eta_w$  je izkoristek električne moči varilnega stroja in  $n_{sc}$  je število moznikov. Stroji za obločno varjenje valjčnih moznikov so zasnovani kot stroji konstantne električne moči. Izhodna napetost običajno znaša med 20 in 40 V, glej (Cary, 1995).

Jakost varilnega električnega toka  $I_{sw}$  in čas varjenja  $T_{sw}$  sta odvisna od premera stebra valjčnega moznika  $d_s$  (mm). V podatkih različnih proizvajalcev strojev za obločno varjenje moznikov je možno zaslediti podatke, da stroji omogočajo varjenje pri jakosti električnih tokov od 0,2 do 2500 kA. Nekaj bolj natančnih smernic za jakost električnega toka in čas varjenja v odvisnosti od premera stebra



Slika 4 • Varilni tok  $I_{sw}$  v odvisnosti od premera stebra valjčnega moznika  $d_s$

valjčnega moznika so podane od podjetja Stud Welding Associates (Stud Welding Associates, 2004). Na podlagi predlaganih smeric smo razvili aproksimacijske funkcije za jakost varilnega električnega toka  $I_{sw}$  (glej sliko 4) in čas varjenja  $T_{sw}$  (glej sliko 5) za valjčne moznike s premerom stebra  $d_s$  od 6 do 25 mm v naslednji obliki:

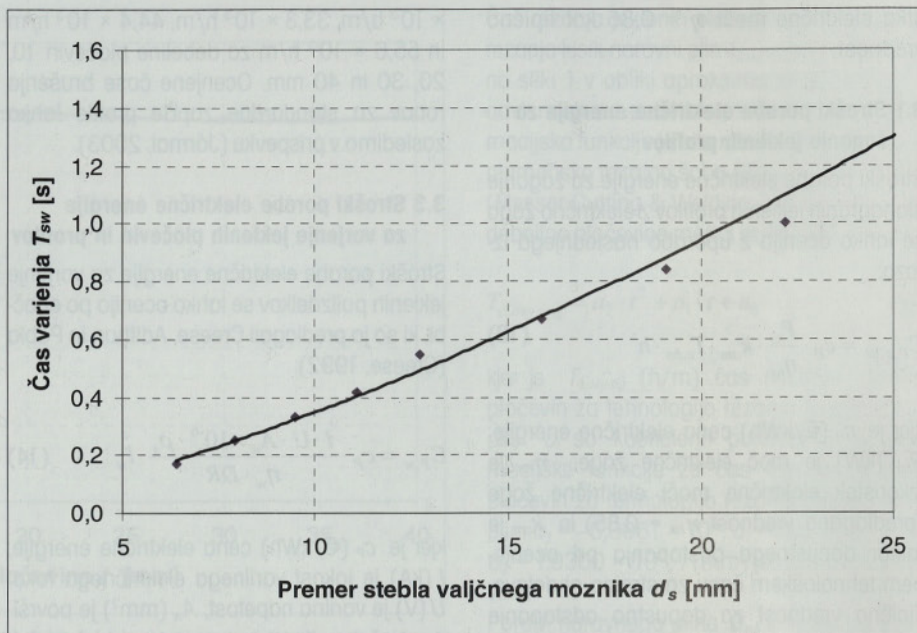
$$I_{sw} = p_1 \cdot d_s - p_0 \quad (17)$$

$$T_{sw} = e_1 \cdot d_s^{e_0} \quad (18)$$

kjer je  $I_{sw}$  (kA) jakost varilnega električnega toka;  $p_1$  sta koeficienta linearne aproksimacijske funkcije za jakost varilnega električnega toka pri polavtomatskem obločnem varjenju valjčnih moznikov;  $p_1 = 8,3555 \times 10^{-2}$  in  $p_0 = -1,7820 \times 10^{-1}$ ;  $T_{sw}$  (s) je čas obločnega varjenja moznika;  $e_1 = 1,2738 \times 10^{-2}$  in  $e_0 = 1,4369$  sta koeficient in potenca potence aproksimacijske funkcije za čas polavtomatskega obločnega varjenja moznika;  $d_s$  (mm) je premer stebra valjčnega moznika. V primeru, da se varjenje moznikov izvaja na gradbišču, je potrebno pri stroških porabe električne energije upoštevati tudi dodatne stroške za postavitev transformatorske postaje.

### 3.5 Stroški porabe električne energije za vibriranje betona

Konsolidacija betona se običajno izvede z uporabo različnih tipov mehanskih vibratorjev,



Slika 5 • Čas varjenja  $T_{sw}$  v odvisnosti od premera stebra valjčnega moznika  $d_s$

kot so površinski vibratorji, vibracijske igle, vibracijske mize in opažni vibratorji. V visokogradnji so med omenjenimi tipi vibratorjev najbolj pogosto uporabljene vibracijske igle. Z naslednjim izrazom lahko ocenimo stroške porabe električne energije za konsolidacijo betona z električnimi vibracijskimi iglami:

$$C_{P,v} = c_P \cdot \frac{P_v}{\eta_v} \cdot T_v \cdot A_{cs} \quad (19)$$

kjer je  $c_P$  (€/kWh) cena električne energije;  $P_v$  (kW) je moč električne vibracijske igle;  $\eta_v$  je izkoristek električne moči vibracijske igle (predlagana vrednost  $\eta_v = 0,85$ );  $T_v$  (h/m<sup>2</sup>) je čas za ustrezno konsolidacijo betona in  $A_{cs}$  (m<sup>2</sup>) je površina betonske plošče. Za primere, ko so premeri glave vibracijske igle med  $\varnothing 30$  in  $\varnothing 48$  mm in debeline betonskih plošč med 10 in 25 cm, znaša čas za konsolidacijo betona med 0,2 in 0,4 h/m<sup>2</sup>, glej (Bučar, 1999).

## 4 • STROŠKI DELA

Predstavljena ocenitev stroškov dela je izvedena na podlagi proizvodnih časov za izkušene in kvalificirane delavce. Stroški dela, ki so neodvisni od števila kosov (npr. stroški pripravljalnih del) in neproduktivni stroški (npr. stroški menjave orodij), niso posebej obravnavani v okviru članka. V prispevkih (Müller, 1996a, 1996b) se lahko zasledi podatek, da odstotek neproduktivnih časov v gradbeni industriji znaša nekeje okoli 30 % produktivnih časov. Za kovinskopredelovalno industrijo so Creese, Adithan in Pabla (Creese, 1992) predlagali, da se upošteva 9 % dodatnega časa na ocenjeni produktivni čas strojne obdelave in 15 % dodatnega časa na ocenjeni čas manipulacije z izdelki.

### 4.1 Stroški dela za rezanje pločevin in profilov

Stroški dela za rezanje standardnih jeklenih profilov z električno žago se lahko ocenijo z enačbo:

$$C_{L,c,hs} = c_L \cdot k_{am} \cdot T_{c,hs} \cdot h \quad (20)$$

kjer je  $c_L$  (€/h) stroškovna urna postavka delavca;  $k_{am}$  je faktor dopustnega odstopanja pri ocenjenem tehnološkem času za strojno obdelavo;  $T_{c,hs}$  (h/m) je čas žaganja profilov z električno žago in  $h$  (m) je višina jeklenega profila.

Stroški dela za plinsko rezanje jeklenih pločevin se lahko ocenijo z naslednjim izrazom:

$$C_{L,c,gas\ tech.} = c_L \cdot k_{csr} \cdot T_{c,gas\ tech.} \cdot l_c \quad (21)$$

kjer je  $c_L$  (€/h) stroškovna urna postavka delavca;  $k_{csr}$  je faktor redukcije hitrosti rezanja;  $T_{c,gas\ tech.}$  (h/m) je čas rezanja pločevin za izbrano tehnologijo plinskega rezanja in  $l_c$  (m) je dolžina rezanja.

### 4.2 Stroški dela za brušenje robov pločevin in profilov

Ocenitev stroškov dela za ročno brušenje robov pločevin in profilov se lahko izvede s formulo:

$$C_{L,g} = c_L \cdot k_{am} \cdot T_g \cdot l_g \quad (22)$$

kjer je  $c_L$  (€/h) stroškovna urna postavka delavca;  $k_{am}$  je faktor dopustnega odstopanja pri ocenjenem tehnološkem času za strojno obdelavo;  $T_g$  (h/m) je čas brušenja robov z

električnim brusilnikom in  $l_g$  (m) je dolžina brušenja.

### 4.3 Stroški dela za pripravo, sestavljanje in pritrjevanje elementov za varjenje

Stroški dela za pripravo, sestavljanje in pritrjevanje elementov za varjenje se lahko ocenijo z enačbo:

$$C_{L,p,a,t} = c_L \cdot T_{p,a,t} \quad (23)$$

kjer je  $c_L$  (€/h) stroškovna urna postavka delavca;  $T_{p,a,t}$  (h) je čas, potreben za pripravo, sestavljanje ter pritrjevanje elementov. Jármaj in Farkas (Jármaj, 1999) sta predlagala uporabo naslednje enačbe:

$$T_{p,a,t} = \frac{C_1}{60} \cdot \Theta_d \cdot \sqrt{\kappa \cdot \rho_s \cdot V_s} \quad (24)$$

kjer je  $C_1$  (min/kg<sup>0.5</sup>) koeficient pripravljalnega časa, katerega vrednost je odvisna od tehnologije varjenja (običajno je  $C_1 = 1,0$  min/kg<sup>0.5</sup>), glej (Jármaj, 2003);  $\Theta_d$  je faktor težavnosti, ki upošteva zahtevnost konstrukcije;  $\kappa$  je število z varji stikanih elementov;  $\rho_s$  označuje gostoto jekla 7850 kg/m<sup>3</sup> in  $V_s$  (m<sup>3</sup>) je volumen konstrukcijskega jekla. Vrednost koeficienta težavnosti  $\Theta_d$  je odvisna od oblike konstrukcije (ravninska ali prostorska konstrukcija) in tipa konstrukcijskih elementov (ploščati elementi, odprti profili ali zaprti profili). Velikost koeficienta težavnosti  $\Theta_d$  znaša med 1 in 4, glej (Jármaj, 1999).

### 4.4 Stroški dela za varjenje pločevin in profilov

V članku je bolj podrobno obravnavana ocena stroškov dela za ročno elektro-obločno varjenje zvarov z oplasčeno elektrodo (*Shielded Metal Arc Welding, SMAW*). Predstavljeni parametri so ovrednoteni pri varilnem toku in napetosti 230 A / 25 V, pri povprečni hitrosti vgrajevanja dodatne mase kovine v zvar 3,7 kg/h in z upoštevanjem osnovne obdelave zvarov s kladivom po varjenju. Stroški dela za ročno obločno varjenje pločevin in profilov se lahko ocenijo z naslednjim izrazom:

$$C_{L,SMAW} = c_L \cdot k_d \cdot k_{wp} \cdot k_{wd} \cdot k_{wl} \cdot k_r \cdot T_{SMAW} \cdot l_w \quad (25)$$

kjer je  $c_L$  (€/h) stroškovna urna postavka delavca;  $k_d$  je faktor težavnosti, ki upošteva

lokalne delovne razmere ( $k_d$  je definiran med 0,8 in 1,2 za izkušenega in kvalificiranega varilca; v normalnih delovnih razmerah se lahko privzame  $k_d = 1,0$ );  $k_{wp}$  je faktor težavnosti, ki upošteva položaj varjenja (pri varjenju na ravni horizontalni površini je  $k_{wp} = 1,0$ ; pri varjenju na vertikalni površini in pri nadglavnem varjenju je  $k_{wp} = 1,1$ );  $k_{wd}$  je faktor težavnosti, ki upošteva smer varjenja (pri varjenju na ravni horizontalni površini je  $k_{wd} = 1,0$ ; pri varjenju na vertikalni površini in pri nadglavnem varjenju: za vertikalne zware je  $k_{wd} = 1,0$  in za horizontalne zware je  $k_{wd} = 1,4$ );  $k_{wl}$  je faktor težavnosti, ki upošteva obliko in dolžino zvarov (za neprekinjene zware in zware, daljše od 0,5 m je  $k_{wl} = 1,0$ ; za prekinjene zware in zware, krajše od 0,5 m je  $k_{wl} = 1,2$ );  $k_r$  je faktor težavnosti, ki upošteva žlebljenje korena zvara (za zware z izžlebljenim korenem je  $k_r = 1,2$ ; v ostalih primerih je  $k_r = 1,0$ );  $T_{SMAW}$  (h/m) je čas varjenja in  $l_w$  (m) je dolžina zvara.

Jármaj in Farkas (Jármaj, 1999) sta v svojem prispevku predstavila čase varjenja za različne tehnologije varjenja, različne vrste zvarov in debeline pločevin do 15 mm. Pavlovčič, Krajnc in Beg (Pavlovčič, 2004) so predstavili aproksimacijske funkcije za čase varjenja kotnih zvarov debelin do 21 mm, čelnih 1/2 V zvarov debelin do 26 mm in čelnih K zvarov debelin do 50 mm.

V tem članku obravnavamo čase ročnega obločnega varjenja kotnih zvarov debelin 3–28 mm in 60° V zvarov debelin 3–40 mm. Predstavljeni časi varjenja so bili vzeti iz normativov podjetja Metalna in vključujejo čas izdelave, čas odstranitve obrizgov ter žilindre

kakor tudi vse pomožne čase. V primeru 60° V zvarov predstavljeni časi varjenja vključuje še dodatni čas za varjenje korena zvara s tanko elektrodo premera  $\varnothing 2,5$  mm. Čase varjenja kotnih zvarov  $T_{SMAW,F}$  in 60° V zvarov  $T_{SMAW,60^\circ V}$  lahko prikazemo v odvisnosti od debeline zvara  $a_w$  (mm), glej slike 6 in 7. Aproksimacijske krivulje časov varjenja so razvite v naslednjih oblikah:

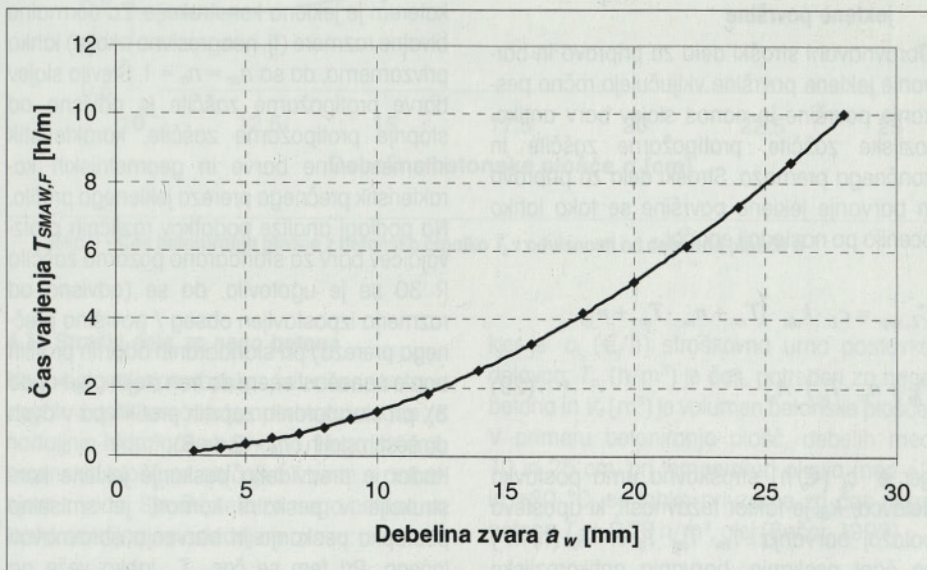
$$T_{SMAW,F} = f_2 \cdot a_w^2 + f_1 \cdot a_w + f_0 \quad (26)$$

$$T_{SMAW,60^\circ V} = g_6 \cdot a_w^6 + g_5 \cdot a_w^5 + g_4 \cdot a_w^4 + g_3 \cdot a_w^3 + g_2 \cdot a_w^2 + g_1 \cdot a_w + g_0 \quad (27)$$

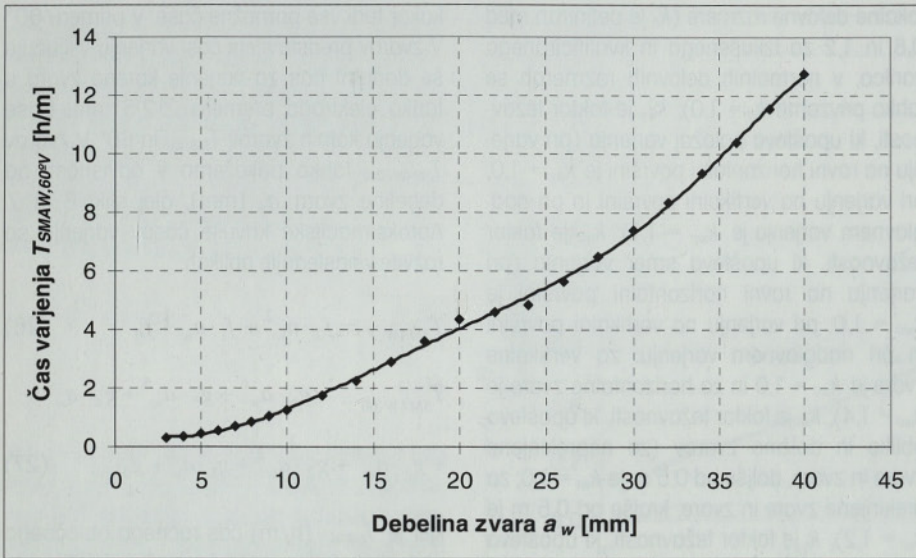
kjer je  $T_{SMAW,F}$  (h/m) čas ročnega obločnega varjenja kotnih zvarov;  $f_i$  označuje koeficiente polinomne aproksimacijske funkcije za čas ročnega obločnega varjenja kotnih zvarov:  $f_2 = 1,2653 \times 10^{-2}$ ,  $f_1 = 1,3773 \times 10^{-3}$  in  $f_0 = 1,6111 \times 10^{-2}$ ;  $T_{SMAW,60^\circ V}$  (h/m) je čas ročnega obločnega varjenja 60° V zvarov;  $g_i$  so koeficienti polinomne aproksimacijske funkcije za čas ročnega obločnega varjenja 60° V zvarov:  $g_6 = -3,4276 \times 10^{-8}$ ,  $g_5 = 3,4744 \times 10^{-6}$ ,  $g_4 = -1,1151 \times 10^{-4}$ ,  $g_3 = 8,3702 \times 10^{-4}$ ,  $g_2 = 2,1609 \times 10^{-2}$ ,  $g_1 = -1,4801 \times 10^{-1}$  in  $g_0 = 5,6572 \times 10^{-1}$ ;  $a_w$  (mm) je debelina zvara.

### 4.5 Stroški dela za varjenje moznikov

Pri gradnji sovprednih konstrukcij iz betona in jekla se strižni mozniki zvarijo na vrh jeklenege profila in potem zabetonirajo. Enačbo (26) lahko uporabimo pri ocenitvi časov varjenja za toge moznike in sidra. Stroške dela za po-



Slika 6 • Čas varjenja kotnih zvarov  $T_{SMAW,F}$  v odvisnosti od debeline zvara  $a_w$



Slika 7 • Čas varjenja 60° V zvarov  $T_{SMAW,60^\circ}$  v odvisnosti od debeline zvara  $a_w$

lavitomatsko obločno varjenje valjčnih mozni- kov lahko ocenimo z naslednjim izrazom:

$$C_{L,sw} = c_L \cdot n_{sc} \cdot T_{swp} \quad (28)$$

kjer je  $c_L$  (€/h) stroškovna urna postavka delavca;  $n_{sc}$  je število valjčnih moznikov in  $T_{swp}$  (h/moznik) je čas, potreben za varjenje moznika, postavitve in odstranitve keramičnega obročka ter čiščenje varjenega stika. V primeru izvedbe polavtomatskega obločnega varjenja valjčnih moznikov na ravni površini se lahko privzame  $T_{swp} = 55,55 \times 10^{-4}$  h/moznik.

#### 4.6 Stroški dela za pripravo in barvanje jeklene površine

Obravnavani stroški dela za pripravo in barvanje jeklene površine vključujejo ročno peskanje površine in nanos slojev barv antikorozijske zaščite, protipožarne zaščite in končnega premaza. Stroški dela za pripravo in barvanje jeklene površine se tako lahko ocenijo po naslednji enačbi:

$$C_{L,ssp} = c_L \cdot k_{dp} \cdot (T_{ss} + n_{ac} \cdot T_{ac} + n_{fp} \cdot T_{fp} + n_{ic} \cdot T_{ic}) \cdot A_{ss} \quad (29)$$

kjer je  $c_L$  (€/h) stroškovna urna postavka delavca;  $k_{dp}$  je faktor težavnosti, ki upošteva položaj barvanja;  $T_{ss}$ ,  $T_{ac}$ ,  $T_{fp}$  in  $T_{ic}$  (h/m<sup>2</sup>) so časi peskanja, barvanja antikorozijske zaščite, protipožarne zaščite in končnega pre-

maza;  $n_{ac}$ ,  $n_{fp}$  in  $n_{ic}$  so števila slojev barve antikorozijske zaščite, protipožarne zaščite in končnega premaza;  $A_{ss}$  (m<sup>2</sup>) je površina jeklene konstrukcije, ki je predvidena za barvanje.

Jármai in Farkas (Jármai, 1999) sta predlagala vrednosti za faktorje težavnosti položaja barvanja  $k_{dp}$ , in sicer:  $k_{dp} = 1,0$ ,  $k_{dp} = 2,0$  in  $k_{dp} = 3,0$  za horizontalni, vertikalni in nadglavni položaj barvanja. Poleg tega sta predlagala vrednosti za čas peskanja  $T_{ss} = 0,050$  h/m<sup>2</sup> in za čas barvanja končnega premaza  $T_{ic} = 0,069$  h/m<sup>2</sup>. Za horizontalni položaj barvanja lahko privzamemo čase barvanja  $T_{ac} = T_{fp} = 0,050$  h/m<sup>2</sup>.

Število slojev antikorozijskega in končnega premaza je odvisno od agresivnosti okolja, v katerem je jeklena konstrukcija. Za normalne bivalne razmere (tj. neagresivno okolje) lahko privzamemo, da so  $n_{ac} = n_{ic} = 1$ . Število slojev barve protipožarne zaščite je odvisno od stopnje protipožarne zaščite, karakteristik intumescentne barve in geometrijskih karakteristik prečnega prereza jeklenega profila. Na podlagi analize podatkov različnih proizvajalcev barv za standardno požarno zaščito R 30 se je ugotovilo, da se (odvisno od razmerja izpostavljen obseg / površina prečnega prereza) pri standardnih odprtih profilih barva nanaša v enem do treh slojih ( $n_{fp} = 1$  do 3), pri standardnih zaprtih profilih pa v dveh do šestih slojih ( $n_{fp} = 2$  do 6).

Kadar je predvideno peskanje jeklene konstrukcije v peskalni komori, je smiselno postopka peskanja in barvanja obravnavati ločeno. Pri tem se čas  $T_{ss}$  lahko veže na dolžino peskanega elementa.

#### 4.7 Stroški dela za opaževanje

Natančna ocenitev stroškov dela za opaževanje betonskih konstrukcijskih elementov je težavno opravilo, saj so produkcijski časi zelo odvisni od geometrije opaževanega elementa, višine, na kateri opažujemo element, usposobljenosti in izkušenosti osebja ter samega opažnega sistema. Stroški dela za opaževanje betonske plošče se lahko ocenijo z naslednjim izrazom:

$$C_{L,f} = c_L \cdot T_f \cdot A_{cs} \quad (30)$$

kjer je  $c_L$  (€/h) stroškovna urna postavka delavca;  $T_f$  (h/m<sup>2</sup>) je čas opaževanja, ki vključuje montažo opažnega sistema, niveliranje opažne površine, demontažo opažnega sistema in čiščenje opažnih plošč;  $A_{cs}$  (m<sup>2</sup>) je površina opaževanja betonske plošče. Čas opaževanja v visokogradnji z usposobljenimi delavci in z uporabo sodobnih montažnih opažnih sistemov znaša nekje med 0,2 in 0,3 h/m<sup>2</sup>, glej (Bučar, 1999).

#### 4.8 Stroški dela za rezanje, postavitve in vezanje armature

Stroški dela za rezanje, postavitve in vezanje mrežne armature v betonsko ploščo se lahko ocenijo z uporabo naslednje enačbe:

$$C_{L,r} = c_L \cdot k_{rh} \cdot k_{ri} \cdot T_r \cdot \rho_s \cdot V_r \quad (31)$$

kjer je  $c_L$  (€/h) stroškovna urna postavka delavca;  $k_{rh}$  je faktor težavnosti, ki upošteva višino opaževanja konstrukcije (za višino opaževanja konstrukcije do 6 m je  $k_{rh} = 1,00$ ; za višino opaževanja konstrukcije nad 6 m je  $k_{rh} = 1,20$ );  $k_{ri}$  je faktor težavnosti, ki upošteva naklon betonske plošče (za naklon betonske plošče do 30° je  $k_{ri} = 1,00$ ; za naklon betonske plošče nad 30° je  $k_{ri} = 1,10$ );  $T_r$  (h/kg) je čas, potreben za rezanje, postavitve in vezanje mrežne armature.

Na sliki 8 je prikazan čas, potreben za rezanje, postavitve in vezanje mrežne armature  $T_r$  v odvisnosti od masne porabe mrežne armature na m<sup>2</sup> uporabne površine betonske plošče, tj. razmerja  $\rho_s \cdot V_r / A_{cs}$  v območju običajne porabe med 2,0–10,0 kg/m<sup>2</sup>. Prikazana aproksimacijska funkcija temelji na podatkih, predlaganih v delu (Bučar, 1999) in je razvita v naslednji obliki:

$$T_r = h_1 \cdot \left( \frac{\rho_s \cdot V_r}{A_{cs}} \right)^{h_0} \quad (32)$$



kjer sta  $h_1 = 5,2004 \times 10^{-2}$  in  $h_0 = -0,6814$  koeficient in potenca potence aproksimacijske funkcije za čas rezanja, postavitve in vezanja mrežne armature. Pri razmerju  $\rho_s \cdot V_r / A_{cs}$  manjšem od  $2,0 \text{ kg/m}^2$ , se privzame  $T_r = 0,0355 \text{ h/kg}$ , za razmerje  $\rho_s \cdot V_r / A_{cs}$  večjem od  $10,0 \text{ kg/m}^2$ , pa se privzame  $T_r = 0,0090 \text{ h/kg}$ .

#### 4.9 Stroški dela za betoniranje

Vgrajevanje betona z betonsko črpalko je najpogostejše uporabljena metoda pri gradnji betonskih in sovprežnih konstrukcij. Stroški dela za vgrajevanje betona v ploščo z betonsko črpalko se lahko ocenijo z uporabo naslednje formule:

$$C_{L,c} = c_L \cdot T_c \cdot V_c \quad (33)$$

kjer je  $c_L$  (€/h) stroškovna urna postavka delavca;  $T_c$  (h/m<sup>3</sup>) je čas betoniranja plošče z betonsko črpalko in  $V_c$  (m<sup>3</sup>) je volumen betonske plošče.

Na sliki 9 je prikazana aproksimacijska funkcija za čas betoniranja plošče z betonsko črpalko  $T_c$  v odvisnosti od debeline betonske plošče  $d$ . Aproksimacijska funkcija je razvita za povprečno mobilno betonsko črpalko z učinkovitim vertikalnim dosegom 20 m in debeline betonskih plošč med 10 in 25 cm na podlagi podatkov, podanih v delu (Bučar, 1999), v naslednji obliki:

$$T_c = i_2 \cdot d^2 + i_1 \cdot d + i_0 \quad (34)$$

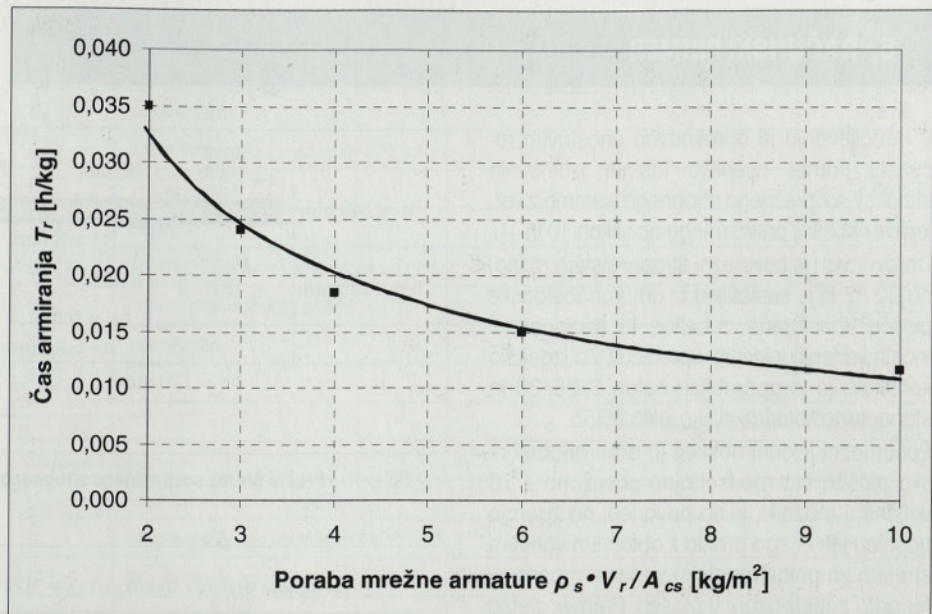
kjer je  $T_c$  (h/m<sup>3</sup>) čas, potreben za betoniranje plošče z betonsko črpalko;  $i_2 = 2,4000 \times 10^{-3}$ ,  $i_1 = -5,4000 \times 10^{-2}$  ter  $i_0 = 9,9500 \times 10^{-1}$  so koeficienti polinomne aproksimacijske funkcije za čas betoniranja plošče z betonsko črpalko;  $d$  (cm) je debelina betonske plošče.

#### 4.10 Stroški dela za vibriranje betona

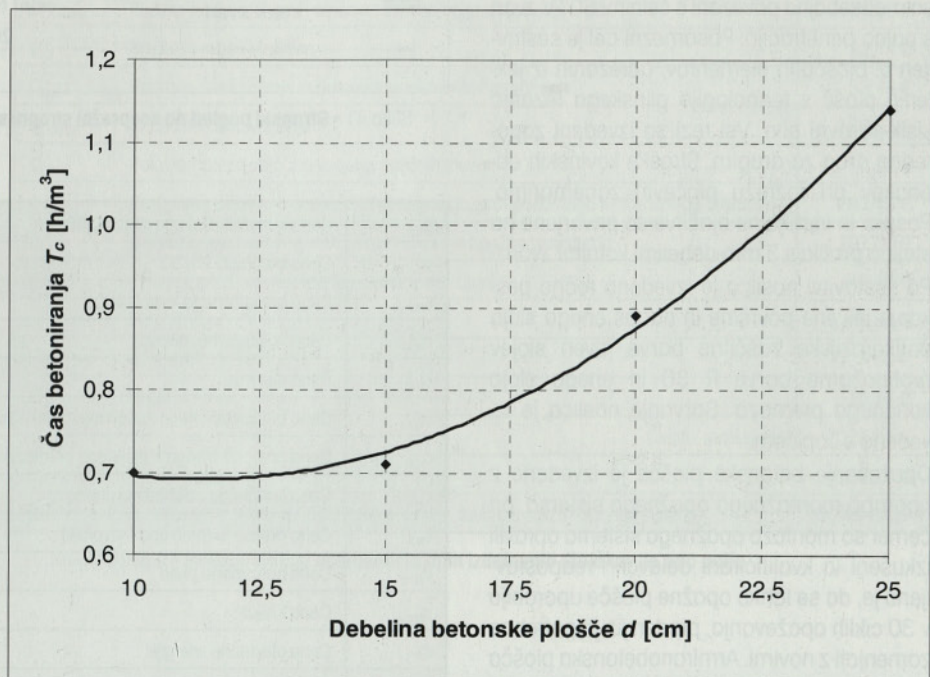
Z naslednjo enačbo lahko ocenimo stroške dela za konsolidacijo betona pri uporabi vibracijske igle:

$$C_{L,v} = c_L \cdot T_v \cdot A_{cs} \quad (35)$$

kjer je  $c_L$  (€/h) stroškovna urna postavka delavca;  $T_v$  (h/m<sup>2</sup>) je čas, potreben za ustrezno konsolidacijo betona in  $A_{cs}$  (m<sup>2</sup>) je površina betonske plošče.



Slika 8 • Čas, potreben za rezanje, postavitve in vezanje mrežne armature  $T_r$  v odvisnosti od masne porabe mrežne armature na m<sup>2</sup> uporabne površine betonske plošče  $\rho_s \cdot V_r / A_{cs}$



Slika 9 • Čas betoniranja plošče z betonsko črpalko  $T_c$  v odvisnosti od debeline plošče  $d$

#### 4.11 Stroški dela za nego betona

Nega betona je postopek, s katerim se betonu zagotovi ustrezen čas, temperatura in voda za nadaljnjo hidratacijo cementa. Nega strjenih betonskih plošč se običajno izvede s polivanjem z vodo. Stroški dela za nego betona se lahko ocenijo po naslednjem izrazu:

$$C_{L,cc} = c_L \cdot T_{cc} \cdot V_c \quad (36)$$

kjer je  $c_L$  (€/h) stroškovna urna postavka delavca;  $T_{cc}$  (h/m<sup>3</sup>) je čas, potreben za nego betona in  $V_c$  (m<sup>3</sup>) je volumen betonske plošče. V primeru betoniranja plošč, debelih med 10 in 25 cm, pri temperaturi okolja med +2 in +20 °C, se lahko privzame za čas nege betona  $T_{cc} = 0,20 \text{ h/m}^3$ , glej (Bučar, 1999).

## 5 • RAČUNSKI PRIMER

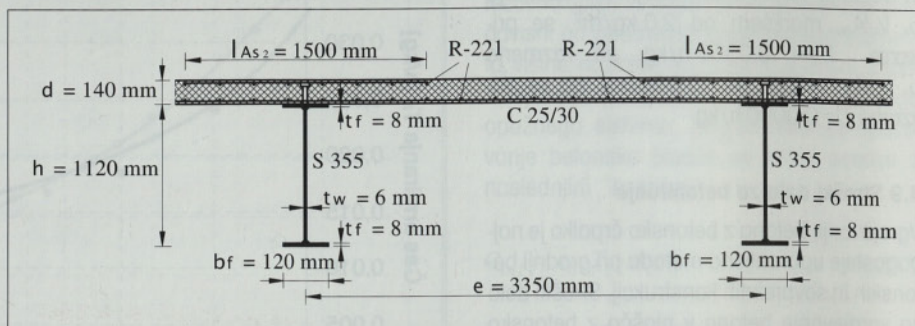
V nadaljevanju je obravnavan enostaven računski primer ocenitve lastnih izdelavnih stroškov sovprežnega stropnega sistema z varjenimi / nosilci, prikazanega na slikah 10 in 11. Obravnavan je sovprežni stropni sistem razpona 20 m, ki je sestavljen iz armiranobetonske plošče konstantne debeline in dvojsimetričnih varjenih jeklenih / prerezov. Za izdelavo konstrukcije je uporabljen beton C 25/30 in standardno konstrukcijsko jeklo S 355.

Posamezni jekleni nosilec in armiranobetonska plošča sta medsebojno povezana s 76 valjčnimi mozniki, ki so privarjeni na zgornjo pasnico jeklenega profila z obločnim varilnim strojem za polavtomatsko varjenje moznikov ter nato zabetonirani v ploščo. Premer stebila moznika je 19 mm, celotna višina moznika pa znaša 100 mm.

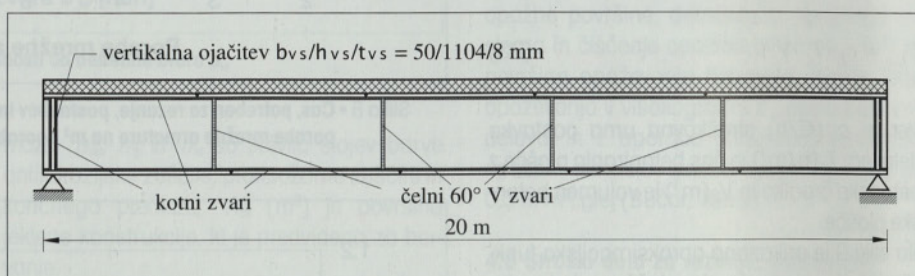
Vsak jekleni nosilec je sestavljen iz 5 delov, ki so medsebojno povezani s čelnimi 60° V zvari s polno penetracijo. Posamezni del je sestavljen iz ploščatih elementov, odrezanih iz jeklenih plošč s tehnologijo plinskega rezanja kisik-naravni plin. Vsi rezi so izvedeni zaporedno drug za drugim. Stroške kovinskih odpadkov pri razrezu pločevin zanemarimo. Pasnice in vertikalne ojačitve so privarjene na stojino profila s 3 mm debelimi kotnimi zvari. Po sestavitvi nosilca je izvedeno ročno peskanje jeklene površine in nanos enega sloja antikorozijske zaščitne barve, dveh slojev protipožarne barve R 30 in enega sloja končnega premaza. Barvanje nosilca je izvedeno s čopičem.

Opaževanje betonske plošče je izvedeno z uporabo montažnega opažnega sistema, pri čemer so montažo opažnega sistema opravili izkušeni in kvalificirani delavci. Predpostavljeno je, da se lahko opažne plošče uporabijo v 30 ciklih opaževanja, preden jih je potrebno zamenjati z novimi. Armiranobetonska plošča je dimenzionirana kot kontinuirna plošča, nosilna v smeri prečno na jeklene nosilce. Na ta način je tudi armirana z enosmerno nosilno rebrasto mrežno armaturo R-221 iz jekla S 400. Beton je vgrajen v ploščo s pomočjo mobilne betonske črpalke. Konsolidacija betona je izvedena z uporabo vibracijskih igel. Betonska plošča je negovana s polivanjem vode še 3 dni po betoniranju.

Stroškovni parametri materiala, energije in dela za ocenitev lastnih izdelavnih stroškov za obravnavani sovprežni stropni sistem so prikazani v preglednici 1.



Slika 10 • Prečni prerez sovprežnega stropnega sistema z varjenimi I nosilci



Slika 11 • Stranski pogled na sovprežni stropni sistem z varjenimi I nosilci

|            |   |       |                  |
|------------|---|-------|------------------|
| $C_{M,s}$  | Cena konstrukcijskega jekla S 355           | 1,00  | €/kg             |
| $C_{M,c}$  | Cena betona C 25/30                         | 85,00 | €/m <sup>3</sup> |
| $C_{M,r}$  | Cena armaturnega jekla S 400                | 0,70  | €/kg             |
| $C_{M,sc}$ | Cena valjčnih moznikov                      | 0,50  | €/moznik         |
| $C_{M,e}$  | Cena elektrod                               | 1,70  | €/kg             |
| $C_{M,oc}$ | Cena antikorozijskega zaščitnega premaza    | 0,85  | €/m <sup>2</sup> |
| $C_{M,tp}$ | Cena protipožarnega zaščitnega premaza R 30 | 9,00  | €/m <sup>2</sup> |
| $C_{M,kc}$ | Cena končnega zaščitnega premaza            | 0,65  | €/m <sup>2</sup> |
| $C_{M,p}$  | Cena prefabriciranih opažnih plošč          | 30,00 | €/m <sup>2</sup> |
| $C_{M,ng}$ | Cena naravnega plina                        | 0,50  | €/m <sup>3</sup> |
| $C_{M,ov}$ | Cena kisika                                 | 1,60  | €/m <sup>3</sup> |
| $C_p$      | Cena električne energije                    | 0,10  | €/kWh            |
| $C_L$      | Stroškovna urna postavka delavca            | 10,00 | €/h              |

Preglednica 1 • Stroškovni parametri materiala, energije in dela

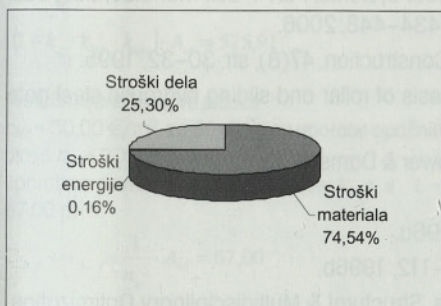
V Dodatku je predstavljena ocenitev naslednjih lastnih izdelavnih stroškov za sovprežni stropni sistem:

- *stroškov materiala* konstrukcijskega jekla S 355, betona C 25/30, rebraste mrežne armature R-221 S 400, valjčnih moznikov, elektrod, antikorozijske barve, protipožarne barve, barve končnega premaza, prefabriciranih opažnih plošč, naravnega plina in kisika;

- *stroškov porabe električne energije* za brušenje robov, proces obločnega varjenja jeklenih pločevin, proces obločnega varjenja valjčnih moznikov in vibriranje betona;
- *stroškov dela* za rezanje jeklenih pločevin, brušenje robov, pripravo, sestavljanje in pritrjevanje elementov za varjenje, ročno obločno varjenje pločevin, polavtomatsko obločno varjenje valjčnih moznikov, ročno peskanje

jeklene površine, ročni nanos antikorozijske barve, ročni nanos protipožarne barve, ročni nanos barve končnega premaza, montaže opažnega sistema, rezanje, postavitve in vezanje mrežne armature, betoniranje, konsolidacija in nego betona.

Rekapitulacija ocenjenih lastnih izdelavnih stroškov enega polja (en jekleni nosilec in betonska plošča širine  $e$ ) sovprežnega stropnega sistema je prikazana v preglednici 2, razporeditev stroškov pa je prikazana na sliki 12.



Slika 12 • Razporeditev ocenjenih lastnih izdelavnih stroškov

Pri podanih vhodnih podatkih je ugotovljeno, da celotni stroški materiala predstavljajo 74,54 %, stroški dela 25,30 % in stroški električne energije 0,16 % ocenjenih lastnih izdelavnih stroškov konstrukcije.

| Stroški materiala:  |  |                        |
|---|--|------------------------|
| $C_{M,s}$   | Konstrukcijsko jeklo S 355   | 1355,27 €              |
| $C_{M,c}$   | Beton C 25/30  | 797,30 €               |
| $C_{M,r}$   | Rebrasta mrežna armatura R-221 S 400   | 144,45 €               |
| $C_{M,sc}$  | Valjni mozniki   | 38,00 €                |
| $C_{M,e}$   | Elektrode  | 20,82 €                |
| $C_{M,oc,pl,c}$   | Antikorozijska barva, protipožarna barva in barva končnega premaza               | 575,91 €               |
| $C_{M,l}$   | Prefabricirane opažne plošče   | 67,00 €                |
| $C_{M,c,ng}$  | Naravni plin   | 1,47 €                 |
| $C_{M,c,ox}$  | Kisik  | 16,15 €                |
| Celotni stroški materiala:  |  | 3016,37 €              |
| Stroški energije:   |  |                        |
| $C_{p,gn}$  | Proces brušenja robov pločevin   | 0,16 €                 |
| $C_{p,w}$   | Proces obločnega varjenja pločevin   | 1,27 €                 |
| $C_{p,sw}$  | Proces obločnega varjenja valjčnih moznikov                                      | 0,06 €                 |
| $C_{p,v}$   | Proces vibriranja betona   | 4,89 €                 |
| Celotni stroški energije:   |  | 6,38 €                 |
| Stroški dela:   |  |                        |
| $C_{L,c,ox-ng}$   | Plinsko rezanje jeklenih pločevin s tehnologijo kisik-naravni plin               | 34,50 €                |
| $C_{L,g}$   | Brušenje robov pločevin  | 12,14 €                |
| $C_{L,p,o,t}$   | Priprava, sestavljanje in pritrdjevanje elementov za varjenje                    | 53,49 €                |
| $C_{L,SMAW}$  | Ročno obločno varjenje   | 162,01 €               |
| $C_{L,sw}$  | Polavtomatsko obločno varjenje valjčnih moznikov                                 | 4,22 €                 |
| $C_{L,sp}$  | Peskanje pločevin in nanos antikorozijskega, protipožarnega ter končnega premaza | 287,49 €               |
| $C_{L,l}$   | Montaža, niveliranje, demontaža in čiščenje opažnega sistema                     | 201,00 €               |
| $C_{L,r}$   | Rezanje, postavitve in vezanje mrežne armature                                   | 49,86 €                |
| $C_{L,c}$   | Betoniranje plošče   | 66,54 €                |
| $C_{L,v}$   | Konsolidacija betona   | 134,00 €               |
| $C_{L,cc}$  | Nega betona  | 18,76 €                |
| Celotni stroški dela:   |  | 1024,01 €              |
| Celotni lastni izdelavni stroški:   |  | 4046,76 €              |
| Celotni lastni izdelavni stroški na m <sup>2</sup> uporabne površine sovprežnega stropnega sistema: |  | 60,49 €/m <sup>2</sup> |

Preglednica 2 • Rekapitulacija ocenjenih lastnih izdelavnih stroškov za eno polje

## 6 • SKLEP

V seriji dveh člankov je predstavljeno stroškovno optimiranje sovprežnih konstrukcij iz betona in jekla. Prvi del predstavlja analizo lastnih izdelavnih stroškov za sovprežne konstrukcije. Lastni izdelavni stroški so definirani kot vsota stroškov materiala, električne energije in dela. Podani so izrazi za ocenitev materialnih stroškov konstrukcijskega jekla, betona, armature, strižnih moznikov, elektrod,

barv antikorozijske, protipožarne in končne zaščite, opažnih plošč in rezalnih plinov. Predstavljena je ocenitev stroškov porabe električne energije za žaganje jeklenih profilov, brušenje robov, varjenje, varjenje moznikov in vibriranje betona. Prikazan je način ocenitve stroškov dela za rezanje jeklenih konstrukcijskih polizdelkov, za brušenje robov, za pripravo, sestavitve in pritrdjevanje elementov

za varjenje, za ročno varjenje, za polavtomatsko varjenje valjčnih moznikov, za pripravo in zaščito jeklene površine, za rezanje, postavitve in vezanje armature, za betoniranje, zgoščevanje in nego betona. Stroški projektiranja, transporta, dviga, montaže, amortizacije in vzdrževanja konstrukcije ter posredni stroški niso posebej obravnavani v okviru članka. Predstavljen je računski primer ocenitve lastnih izdelavnih stroškov za prostoležeči sovprežni stropni sistem z dvojnosiometričnimi varjenimi / nosilci, s katerim je po korakih prikazana uporabnost predlaganega pristopa.

Predlagani izrazi za ocenitev lastnih izdelavnih stroškov upoštevajo tudi porabe materialov, električne energije in proizvodnih časov. Zaradi znatnih razlik, ki se pojavljajo pri obravnavanih stroških po

svetu in celo v isti državi med različnimi podjetji, so predlagane enačbe podane v odprti obliki, kar omogoča njihovo uporabo v različnih ekonomskih in tehnoloških razmerah. Predlagani pristop omogoča inženirju

podrobni vpogled v razdelitev lastnih izdelavnih stroškov konstrukcije in možnost, da definira svoje lastne parametre glede na ugotovljene lokalne ekonomske in tehnološke razmere.

## 7 • LITERATURA

- Behr, R.A., Cundy, E.J., Goodspeed, C.H., Cost comparison of timber, steel and prestressed concrete bridges, *Journal of Structural Engineering*, 116(12), str. 3448–3457, 1990.
- Bučar, G., Priručnik za građevinsko podjetništvo / Normativi građevinskih radova, Omišalj: ICG, 1999.
- Creese, R.C., Adithan, M., Pabla, B.S., Estimating and costing for the metal manufacturing industries, New York: Marcel Dekker, Inc., 1992.
- Cary, H.B., Arc welding automation, New York: Marcel Dekker, Inc., 1995.
- Cary, H.B., Modern welding technology, New Jersey: Prentice-Hall, 2002.
- International Protective Coatings, [http://www.international-pc.com/pc/pds/the\\_uk.pdf](http://www.international-pc.com/pc/pds/the_uk.pdf), 2004.
- Jármai, K., Farkas, J., Cost calculation and optimisation of welded steel structures, *Journal of Constructional Steel Research*, 50(2), str. 115–135, 1999.
- Jármai, K., Design, fabrication and economy, *European Integration Studies Publications of the University of Miskolc*, 2(1), str. 91–106, 2003.
- Klanšek, U., Kravanja, S., Cost estimation, optimization and competitiveness of different composite floor systems, Part 1, Self-manufacturing cost estimation of composite and steel structures, *Journal of Constructional Steel Research*, 62(5), str. 434–448, 2006.
- Kravanja, S., Bedenik, B.S., Križanič, M., Flap gates at Bou Hanifia, *International Water Power & Dam Construction*, 47(8), str. 30–32, 1995.
- Kravanja, S., Kravanja, Z., Bedenik, B.S., The MINLP approach to structural synthesis, Part III: Synthesis of roller and sliding hydraulic steel gate structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 43(2), str. 329–364, 1998.
- Kravanja, S., Optimization of the Sultartangi sliding gates in Iceland, *International Journal on Hydropower & Dams*, 9(2), 42–45, 2002.
- Messer Cutting & Welding GmbH, <http://www.messer-cw.de/pdf/Autogenkatalog.pdf>, 2005.
- Müller, J.P., Kalkulation–Schlüssel zum Erfolg, *Betonwerk und Fertigteil–Technik*, 62(2), str. 40–51, 1996a.
- Müller, J.P., Kalkulation–Schlüssel zum Erfolg, Teil 2, *Betonwerk und Fertigteil–Technik*, 62(3), str. 111–112, 1996b.
- Pavlovčič, L., Krajnc, A., Beg, D., Cost function analysis in the structural optimization of steel frames, *Structural & Multidisciplinary Optimization*, 28(4), str. 286–295, 2004.
- Ramirez, J.C., Touran, A., An integrated computer system for estimating welding cost, *Cost Engineering*, 33(8), str. 7–14, 1991.
- Schreve, K., Schuster, H.R., Basson, A.H., Manufacturing cost estimation during design of fabricated parts, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers part B – Journal of Engineering Manufacture*, 213(7), str. 731–735, 1999.
- Singh, S., Cost model for reinforced concrete beam and slab structures in buildings, *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(1), str. 54–67, 1990.
- Stud Welding Associates, <http://www.studwelding.com/products/at/procedures.asp>, 2004.
- Tizani, W.M.K., Nethercot, D.A., Davies, G., Smith, N.J., McCarthy, T.J., Object-oriented fabrication cost model for the economic appraisal of tubular truss design, *Advances in Engineering Software*, 27(1–2), str. 11–20, 1996.

## DODATEK

### A Stroški materiala

*Konstrukcijsko jeklo S 355:*

$c_{M,s} = 1,00 \text{ €/kg}$ ; gostota jekla  $\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$ ;  
volumen konstrukcijskega jekla  $V_s = (2 \cdot b_f \cdot t_f + (h - 2 \cdot t_f) \cdot t_w) \cdot L + 4 \cdot b_{vs} \cdot h_{vs} \cdot t_{vs} = 0,1727 \text{ m}^3$   
 $C_{M,s} = c_{M,s} \cdot \rho_s \cdot V_s = 1355,27$

*Beton C 25/30:*

$c_{M,c} = 85,00 \text{ €/m}^3$ ; volumen betona  $V_c = e \cdot d \cdot L = 9,3800 \text{ m}^3$

$C_{M,c} = c_{M,c} \cdot V_c = 797,30$

*Rebrasta mrežna armatura R-221 S 400:*

$c_{M,r} = 0,70 \text{ €/kg}$ ; gostota jekla  $\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$ ;  
volumen armature  $V_r = (0,50 + 2,21) \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m} \cdot (1,50 \text{ m} + 3,35 \text{ m}) \cdot 20 \text{ m} = 0,0263 \text{ m}^3$

$C_{M,r} = c_{M,r} \cdot \rho_s \cdot V_r = 144,45$

*Valjčni mozniki (premer stebra/višina 19/100 mm):*  
 $c_{M,sc} = 0,50 \text{ €/moznik}$ ; število moznikov  $n_{sc} = 76$  moznikov

$C_{M,sc} = c_{M,sc} \cdot n_{sc} = 38,00$

*Elektrode:*

$c_{M,e} = 1,70 \text{ €/kg}$ ; čelni  $60^\circ$  V zvari z višino stranice korena zvara  $r_f = 2 \text{ mm}$  in s širino odprtine korena zvara  $r_o = 2 \text{ mm}$ ; gostota jekla  $\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$ ; izkoristek elektrode pri obločnem varjenju  $EMY = 0,6$

kolni zvari:

površina prečnega prereza zvara  $A_w = a_w^2 = 9 \text{ mm}^2$ ;  
dolžina zvara  $l_{w1} = 4 \cdot L + 4 \cdot (4 \cdot b_{vs} + 2 \cdot h_{vs}) = 89,63 \text{ m}$

$C_{M,e} = c_{M,e} \cdot A_w \times 10^{-6} \cdot \rho_s \cdot \frac{1}{EMY} \cdot l_{w1} = 17,94$

čelni 60° V zvari – pasnici:

površina prečnega prereza zvara  $A_w = (t_f - r_f)^2 \cdot tg(60^\circ/2) + r_f \cdot t_f = 36,78 \text{ mm}^2$ ;  
dolžina zvara  $l_{w2} = 8 \cdot b_f = 0,96 \text{ m}$

$$C_{M,e} = c_{M,e} \cdot A_w \times 10^{-6} \cdot \rho_s \cdot \frac{1}{EMY} \cdot l_{w2} = 0,79$$

čelni 60° V zvari – stojina:

površina prečnega prereza zvara  $A_w = (f_w - r_f)^2 \cdot tg(60^\circ/2) + r_f \cdot f_w = 21,24 \text{ mm}^2$ ;  
dolžina zvara  $l_{w3} = 4 \cdot (h - 2 \cdot f_f) = 4,42 \text{ m}$

$$C_{M,e} = c_{M,e} \cdot A_w \times 10^{-6} \cdot \rho_s \cdot \frac{1}{EMY} \cdot l_{w3} = 2,09$$

*Antikorozijska barva, protipožarna barva in barva končnega premaza:*

$c_{Mac} = 0,85 \text{ €/m}^2$ ;  $c_{Mfp} = 9,00 \text{ €/m}^2$ ;  $c_{Mkc} = 0,65 \text{ €/m}^2$ ; za nanos barve s čopičem  $k_p = 0,05$ ; za konstrukcije z velikimi in ravnimi površinami za barvanje  $k_{sur} = 1,00$ ; za nanos barve s čopičem  $k_{wc} = 1,00$ ; površina jeklene konstrukcije za barvanje  $A_{ss} = (3 \cdot b_f - 2 \cdot f_w + 2 \cdot h) \cdot L + 4 \cdot (2 \cdot b_{vs} \cdot h_{vs} + f_{vs} \cdot h_{vs}) = 52,2369 \text{ m}^2$

$$C_{M,ac,fp,tc} = (c_{M,ac} + c_{M,fp} + c_{M,tc}) \cdot$$

$$\cdot (1 + k_p \cdot k_{sur} \cdot k_{wc}) \cdot A_{ss} = 575,91$$

*Prefabricirane opažne plošče:*

$c_{Mf} = 30,00 \text{ €/m}^2$ ; za 30 ciklov uporabe opažnih plošč  $n_{uc} = 30$ ;

uporabna površina betonske plošče  $A_{cs} = e \cdot L = 67,00 \text{ m}^2$

$$C_{M,f} = c_{M,f} \cdot \frac{1}{n_{uc}} \cdot A_{cs} = 67,00$$

*Naravni plin in kisik:*

$c_{M,ng} = 0,50 \text{ €/m}^3$ ;  $c_{M,oxy} = 1,60 \text{ €/m}^3$ ;

čas rezanja jeklenih pločevin v odvisnosti od debeline pločevine  $f$  (mm)

$T_{c,oxy-ng} = -6,3961 \times 10^{-6} \cdot f^2 + 8,1248 \times 10^{-4} \cdot f + 1,9300 \times 10^{-2}$  (h/m);

poraba naravnega plina v odvisnosti od debeline pločevine  $f$  (mm)

$Q_{ng} = -8,6803 \times 10^{-7} \cdot f^4 + 1,0969 \times 10^{-4} \cdot f^3 - 4,9262 \times 10^{-3} \cdot f^2 + 9,1898 \times 10^{-2} \cdot f + 4,1176 \times 10^{-1}$  (m<sup>3</sup>/h);

poraba kisika v odvisnosti od debeline pločevine  $f$  (mm)

$Q_{oxy} = 1,4266 \times 10^{-7} \cdot f^6 - 1,8327 \times 10^{-5} \cdot f^5 + 8,8852 \times 10^{-4} \cdot f^4 - 2,0047 \times 10^{-2} \cdot f^3 + 2,0634 \times 10^{-1} \cdot f^2 - 6,3661 \times 10^{-1} \cdot f + 2,2086$  (m<sup>3</sup>/h);

pasnici – pravokotni rez:

debelina pasnice  $t_f = 8 \text{ mm}$ ; za pravokotni rez  $k_{csr} = 1,00$ ;

čas rezanja  $T_{c,oxy-ng} = 0,0254 \text{ h/m}$ ;

poraba naravnega plina  $Q_{ng} = 0,8843 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

poraba kisika  $Q_{oxy} = 3,1337 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

dolžina rezanja  $l_{c1} = 4 \cdot L + 4 \cdot b_f = 80,48 \text{ m}$

$$C_{M,c,ng} = c_{M,ng} \cdot k_{csr} \cdot Q_{ng} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c1} = 0,90$$

$$C_{M,c,oxy} = c_{M,oxy} \cdot k_{csr} \cdot Q_{oxy} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c1} = 10,25$$

stojina – pravokotni rez:

debelina stojine  $t_w = 6 \text{ mm}$ ; za pravokotni rez  $k_{csr} = 1,00$ ;

čas rezanja  $T_{c,oxy-ng} = 0,0239 \text{ h/m}$ ;

poraba naravnega plina  $Q_{ng} = 0,8084 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

poraba kisika  $Q_{oxy} = 2,5027 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

dolžina rezanja  $l_{c2} = 2 \cdot L + 2 \cdot (h - 2 \cdot f_f) = 42,21 \text{ m}$

$$C_{M,c,ng} = c_{M,ng} \cdot k_{csr} \cdot Q_{ng} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c2} = 0,41$$

$$C_{M,c,oxy} = c_{M,oxy} \cdot k_{csr} \cdot Q_{oxy} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c2} = 4,04$$

vertikalne ojačitve – pravokotni rez:

debelina ojačitve  $t_{vs} = 8 \text{ mm}$ ; pravokotni rez  $k_{csr} = 1,00$ ;

čas rezanja  $T_{c,oxy-ng} = 0,0254 \text{ h/m}$ ;

poraba naravnega plina  $Q_{ng} = 0,8843 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

poraba kisika  $Q_{oxy} = 3,1337 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

dolžina rezanja  $l_{c3} = 4 \cdot (2 \cdot b_{vs} + 2 \cdot h_{vs}) = 9,23 \text{ m}$

$$C_{M,c,ng} = c_{M,ng} \cdot k_{csr} \cdot Q_{ng} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c3} = 0,10$$

$$C_{M,c,oxy} = c_{M,oxy} \cdot k_{csr} \cdot Q_{oxy} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c3} = 1,18$$

pasnici – poševni rez pod kotom 30°:

debelina pasnice  $t_f = 8 \text{ mm}$ ; za poševni rez pod kotom 30°  $k_{csr} = 1,25$ ;

čas rezanja  $T_{c,oxy-ng} = 0,0254 \text{ h/m}$ ;

poraba naravnega plina  $Q_{ng} = 0,8843 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

poraba kisika  $Q_{oxy} = 3,1337 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

dolžina rezanja  $l_{c4} = 8 \cdot b_f = 0,96 \text{ m}$

$$C_{M,c,ng} = c_{M,ng} \cdot k_{csr} \cdot Q_{ng} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c4} = 0,01$$

$$C_{M,c,oxy} = c_{M,oxy} \cdot k_{csr} \cdot Q_{oxy} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c4} = 0,15$$

stojina – poševni rez pod kotom 30°:

debelina stojine  $t_w = 6 \text{ mm}$ ; za poševni rez pod kotom 30°  $k_{csr} = 1,25$ ;

čas rezanja  $T_{c,oxy-ng} = 0,0239 \text{ h/m}$ ;

poraba naravnega plina  $Q_{ng} = 0,8084 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

poraba kisika  $Q_{oxy} = 2,5027 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

dolžina rezanja  $l_{c5} = 4 \cdot (h - 2 \cdot f_f) = 4,42 \text{ m}$

$$C_{M,c,ng} = c_{M,ng} \cdot k_{csr} \cdot Q_{ng} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c5} = 0,05$$

$$C_{M,c,oxy} = c_{M,oxy} \cdot k_{csr} \cdot Q_{oxy} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c5} = 0,53$$

## B Stroški energije

*Proces brušenja robov jeklenih pločevin:*

$c_p = 0,10 \text{ €/kWh}$ ; moč električnega brusilnika  $P_{gm} = 1,10 \text{ kW}$ ;  $\eta_{gm} = 0,85$ ;  $k_{am} = 1,09$ ;

čas brušenja  $T_g = 22,2 \times 10^{-3} \text{ h/m}$ ;

dolžina brušenja robov  $l_g = 2 \cdot L + 4 \cdot (2 \cdot b_{vs} + h_{vs}) + 4 \cdot (h - 2 \cdot f_f) + 8 \cdot b_f = 50,19 \text{ m}$

$$C_{P,gm} = c_p \cdot \frac{P_{gm}}{\eta_{gm}} \cdot k_{am} \cdot T_g \cdot l_g = 0,16$$

*Proces obločnega varjenja jeklenih pločevin:*

$c_p = 0,10 \text{ €/kWh}$ ; jakost varilnega električnega toka  $I = 0,23 \text{ kA}$ ; varilna napetost  $U = 25 \text{ V}$ ;

za obločno varjenje  $\eta_w = 0,90$ ;

povprečna hitrost vgrajevanja dodatne mase ko-

vine v zvar  $DR = 3,70 \text{ kg/h}$ ;

gostota jekla  $\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$ ;

kotni zvari:

površina prečnega prereza zvara  $A_w = 9 \text{ mm}^2$ ;

dolžina zvara  $l_{w1} = 4 \cdot L + 4 \cdot (4 \cdot b_{vs} + 2 \cdot h_{vs}) = 89,63 \text{ m}$

$$C_{P,w} = c_p \cdot \frac{I \cdot U \cdot A_w \times 10^{-6} \cdot \rho_s}{\eta_w \cdot DR} \cdot l_{w1} = 1,09$$

čelni 60° V zvari – pasnici:

površina prečnega prereza zvara  $A_w = 36,78 \text{ mm}^2$ ;

dolžina zvara  $l_{w2} = 8 \cdot b_f = 0,96 \text{ m}$

$$C_{P,w} = c_p \cdot \frac{I \cdot U \cdot A_w \times 10^{-6} \cdot \rho_s}{\eta_w \cdot DR} \cdot l_{w2} = 0,05$$

čelni 60° V zvari – stojina:

površina prečnega prereza zvara  $A_w = 21,24 \text{ mm}^2$ ;

dolžina zvara  $l_{w3} = 4 \cdot (h - 2 \cdot f_f) = 4,42 \text{ m}$

$$C_{P,w} = c_p \cdot \frac{I \cdot U \cdot A_w \times 10^{-6} \cdot \rho_s}{\eta_w \cdot DR} \cdot l_{w3} = 0,13$$

*Proces obločnega varjenja valjčnih moznikov:*

$c_p = 0,10 \text{ €/kWh}$ ; število moznikov  $n_{sc} = 76$ ; premer stebra valjčnega moznika  $d_s = 19 \text{ mm}$ ;

za obločno varjenje  $\eta_w = 0,90$ ; varilna napetost  $U_{sw} = 20 \text{ V}$ ;

varilni tok  $I_{sw} = 8,3555 \times 10^{-2} \cdot d_s - 1,7820 \times 10^{-1} = 1,409 \text{ kA}$ ;

čas varjenja  $T_{sw} = 1,2738 \times 10^{-2} \cdot d_s^{1,4369} = 0,88 \text{ s}$

$$C_{P,sw} = c_p \cdot \frac{I_{sw} \cdot U_{sw} \cdot T_{sw}}{\eta_w \cdot 3600} \cdot n_{sc} = 0,06$$

*Proces vibriranja betona:*

$c_p = 0,10 \text{ €/kWh}$ ; moč električne vibracijske igle  $P_v = 3,10 \text{ kW}$ ;

izkoristek električne moči vibracijske igle  $\eta_v = 0,85$ ; uporabna površina betonske plošče  $A_{cs} = 67,00 \text{ m}^2$ ;

vibracijska igla  $\varnothing 48 \text{ mm}$ ; čas potreben za ustrezno konsolidacijo betona z vibracijskimi iglami  $T_v = 0,20 \text{ h/m}^2$

$$C_{P,v} = c_p \cdot \frac{P_v}{\eta_v} \cdot T_v \cdot A_{cs} = 4,89$$

## C Stroški dela

*Plinsko rezanje jeklenih pločevin s tehnologijo kisik-naravni plin:*

$c_L = 10,00 \text{ €/h}$ ;

čas rezanja v odvisnosti od debeline pločevine  $t$  (mm)

$T_{c,oxy-ng} = -6,3961 \times 10^{-6} \cdot t^2 + 8,1248 \times 10^{-4} \cdot t + 1,9300 \times 10^{-2}$  (h/m);

pasnici – pravokotni rez:

debelina pasnice  $t_f = 8 \text{ mm}$ ; za pravokotni rez  $k_{csr} = 1,00$ ;

čas rezanja  $T_{c,oxy-ng} = 0,0254 \text{ h/m}$ ;

dolžina rezanja  $l_{c1} = 4 \cdot L + 4 \cdot b_f = 80,48 \text{ m}$

$$C_{L,c,oxy-ng} = c_L \cdot k_{csr} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c1} = 20,44$$

stojina – pravokotni rez:

debelina stojine  $t_w = 6$  mm; za pravokotni rez  $k_{csr} = 1,00$ ;

čas rezanja  $T_{c,oxy-ng} = 0,0239$  h/m;

dolžina rezanja  $l_{c2} = 2 \cdot L + 2 \cdot (h - 2 \cdot t_f) = 42,21$  m

$$C_{L,c,oxy-ng} = c_L \cdot k_{csr} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c2} = 10,09$$

vertikalne ojačitve – pravokotni rez:

debelina ojačitve  $t_{vs} = 8$  mm; za pravokotni rez  $k_{csr} = 1,00$ ;

čas rezanja  $T_{c,oxy-ng} = 0,0254$  h/m;

dolžina rezanja  $l_{c3} = 4 \cdot (2 \cdot b_{vs} + 2 \cdot h_{vs}) = 9,23$  m

$$C_{L,c,oxy-ng} = c_L \cdot k_{csr} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c3} = 2,34$$

pasnici – poševni rez pod kotom  $30^\circ$ :

debelina pasnice  $t_f = 8$  mm; za poševni rez pod kotom  $30^\circ$   $k_{csr} = 1,25$ ;

čas rezanja  $T_{c,oxy-ng} = 0,0254$  h/m;

dolžina rezanja  $l_{c4} = 8 \cdot b_f = 0,96$  m;

$$C_{L,c,oxy-ng} = c_L \cdot k_{csr} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c4} = 0,30$$

stojina – poševni rez pod kotom  $30^\circ$ :

debelina stojine  $t_w = 6$  mm; za poševni rez pod kotom  $30^\circ$   $k_{csr} = 1,25$ ;

čas rezanja  $T_{c,oxy-ng} = 0,0239$  h/m;

dolžina rezanja  $l_{c5} = 4 \cdot (h - 2 \cdot t_f) = 4,42$  m

$$C_{L,c,oxy-ng} = c_L \cdot k_{csr} \cdot T_{c,oxy-ng} \cdot l_{c5} = 1,32$$

Brušenje robov pločevin:

$c_L = 10,00$  €/h;  $k_{om} = 1,09$ ;

čas brušenja  $T_g = 22,2 \times 10^{-3}$  h/m;

dolžina brušenja  $l_g = 2 \cdot L + 4 \cdot (2 \cdot b_{vs} + h_{vs}) + 4 \cdot (h - 2 \cdot t_f) + 8 \cdot b_f = 50,19$  m

$$C_{L,g} = c_L \cdot k_{om} \cdot T_g \cdot l_g = 12,14$$

Priprava, sestavljanje in pritrjevanje elementov za varjenje:

$c_L = 10,00$  €/h;  $C_1 = 1,00$  min/kg<sup>0,5</sup>; za ravninsko konstrukcijo, dolge kotne zware in za varjenje na ravni horizontalni površini  $\Theta_d = 2,0$ ; število z zvari stikovanih elementov  $\kappa = 19$ ; gostota jekla  $\rho_s = 7850$  kg/m<sup>3</sup>; volumen konstrukcijskega jekla  $V_s = 0,17265$  m<sup>3</sup>;

čas priprave, sestavljanja in pritrjevanje elementov  $T_{p,at} = (C_1/60) \cdot \Theta_d \cdot (\kappa \cdot \rho_s \cdot V_s)^{0,5} = 5,349$  h

$$C_{L,p,at} = c_L \cdot T_{p,at} = 53,49$$

Ročno obločno varjenje:

$c_L = 10,00$  €/h; za usposobljenega varilca v normalnih pogojih dela  $k_{\sigma} = 1,0$ ;

čas varjenja kotnih zvarov v odvisnosti od debeline zvara  $a_w$  (mm)

$T_{SMAW,F} = 1,2653 \times 10^{-2} \cdot a_w^2 + 1,3773 \times 10^{-3} \cdot a_w + 1,6111 \times 10^{-2}$  (h/m);

čas varjenja čelnih  $60^\circ$  V zvarov v odvisnosti od debeline zvara  $a_w$  (mm) =  $f$  (mm)

$T_{SMAW,60^\circ V} = -3,4276 \times 10^{-8} \cdot a_w^6 + 3,4744 \times 10^{-6} \cdot a_w^5 - 1,1151 \times 10^{-4} \cdot a_w^4 + 8,3702 \times 10^{-4} \cdot a_w^3 + 2,1609 \times 10^{-2} \cdot a_w^2 - 1,4801 \times 10^{-1} \cdot a_w + 5,6572 \times 10^{-1}$  (h/m);

kotni zvari:

za varjenje na ravni horizontalni površini  $k_{wp} = 1,0$ ;

za varjenje na ravni horizontalni površini  $k_{wj} = 1,0$ ;

za neprekinjene zware in zware daljše od 0,5 m  $k_{wl} = 1,0$ ; za kotne zware  $k_r = 1,0$ ; debelina zvara  $a_w = 3$  mm;

čas varjenja  $T_{SMAW,F} = 0,1341$  h/m;

dolžina varjenja  $l_{w1} = 4 \cdot L + 4 \cdot (4 \cdot b_{vs} + 2 \cdot h_{vs}) = 89,63$  m

$$C_{L,SMAW,F} = c_L \cdot k_d \cdot k_{wp} \cdot k_{wj} \cdot k_{wl} \cdot k_r \cdot T_{SMAW,F} \cdot l_{w1} = 120,19$$

čelni  $60^\circ$  V zvari – pasnici:

za varjenje na ravni horizontalni površini  $k_{wp} = 1,0$ ;

za varjenje na ravni horizontalni površini  $k_{wj} = 1,0$ ;

za prekinjene zware in zware krajše od 0,5 m  $k_{wl} = 1,2$ ; za zware z izžlebljenim korenem  $k_r = 1,2$ ;

debelina zvara  $a_w = 8$  mm;

čas varjenja  $T_{SMAW,60^\circ V} = 0,8413$  h/m;

dolžina varjenja  $l_{w2} = 8 \cdot b_f = 0,96$  m

$$C_{L,SMAW,60^\circ V} = c_L \cdot k_d \cdot k_{wp} \cdot k_{wj} \cdot k_{wl} \cdot k_r \cdot T_{SMAW,60^\circ V} \cdot l_{w2} = 11,63$$

čelni  $60^\circ$  V zvari – stojina:

za varjenje na vertikalni površini  $k_{wp} = 1,1$ ; za vertikalne zware  $k_{wj} = 1,0$ ; za neprekinjene zware in zware daljše od 0,5 m  $k_{wl} = 1,0$ ; za zware z izžlebljenim korenem  $k_r = 1,2$ ;

čas varjenja  $T_{SMAW,60^\circ V} = 0,5173$  h/m;

dolžina varjenja  $l_{w3} = 4 \cdot (h - 2 \cdot t_f) = 4,42$  m;

$$C_{L,SMAW,60^\circ V} = c_L \cdot k_d \cdot k_{wp} \cdot k_{wj} \cdot k_{wl} \cdot k_r \cdot T_{SMAW,60^\circ V} \cdot l_{w3} = 30,18$$

Polavtomatsko obločno varjenje valjčnih moznikov:

$c_L = 10,00$  €/h; število moznikov  $n_{sc} = 76$ ; čas potreben za varjenje moznika, postavitve/odstranitve keramičnega obročka in čiščenja varjenega stika

$T_{swp} = 55,55 \times 10^{-4}$  h/moznik

$$C_{L,r} = c_L \cdot k_{rh} \cdot k_{ri} \cdot T_r \cdot \rho_s \cdot V_r$$

Peskanje jeklene površine in nanos antikorozijskega, protipožarnega ter končnega premaza:

$c_L = 10,00$  €/h;  $n_{oc} = 1$ ;  $n_{fp} = 2$ ;  $n_{ic} = 1$ ; čas peskanja  $T_{ss} = 0,050$  h/m<sup>2</sup>; časi nanosa antikorozijskega, protipožarnega ter končnega premaza:  $T_{oc} = 0,050$  h/m<sup>2</sup>,  $T_{fp} = 0,050$  h/m<sup>2</sup>,  $T_{ic} = 0,069$  h/m<sup>2</sup>;

spodnja pasnica – zgornja površina:

za horizontalni položaj barvanja  $k_{dp} = 1,0$ ; jeklena površina  $A_{ss1} = (b_f - t_w) \cdot L = 2,2800$  m<sup>2</sup>

$$C_{L,app} = c_L \cdot k_{dp} \cdot (T_{ss} + n_{oc} \cdot T_{oc} + n_{fp} \cdot T_{fp} + n_{ic} \cdot T_{ic}) \cdot A_{ss1} = 6,13$$

pasnici – spodnji površini:

za nadglavni položaj barvanja  $k_{dp} = 3,0$ ; jeklena površina  $A_{ss2} = (2 \cdot b_f - t_w) \cdot L = 4,6800$  m<sup>2</sup>

$$C_{L,app} = c_L \cdot k_{dp} \cdot (T_{ss} + n_{oc} \cdot T_{oc} + n_{fp} \cdot T_{fp} + n_{ic} \cdot T_{ic}) \cdot A_{ss2} = 37,77$$

stojina:

za vertikalni položaj barvanja  $k_{dp} = 2,0$ ; jeklena površina  $A_{ss3} = 2 \cdot h \cdot L = 44,8000$  m<sup>2</sup>

$$C_{L,app} = c_L \cdot k_{dp} \cdot (T_{ss} + n_{oc} \cdot T_{oc} + n_{fp} \cdot T_{fp} + n_{ic} \cdot T_{ic}) \cdot A_{ss3} = 241,02$$

vertikalne ojačitve:

za vertikalni položaj barvanja  $k_{dp} = 2,0$ ;

jeklena površina  $A_{ss4} = 4 \cdot (2 \cdot b_{vs} \cdot h_{vs} + t_{vs} \cdot h_{vs}) = 0,4769$  m<sup>2</sup>

$$C_{L,app} = c_L \cdot k_{dp} \cdot (T_{ss} + n_{oc} \cdot T_{oc} + n_{fp} \cdot T_{fp} + n_{ic} \cdot T_{ic}) \cdot A_{ss4} = 2,57$$

Montaža, niveliranje, demontaža in čiščenje opažnega sistema:

$c_L = 10,00$  €/h; čas montaže, niveliranja, demontaže in čiščenja za prefabricirani opažni sistem  $T_r = 0,30$  h/m<sup>2</sup>; uporabna površina betonske plošče  $A_{cs} = e \cdot L = 67,00$  m<sup>2</sup>

$$C_{L,f} = c_L \cdot T_r \cdot A_{cs} = 201,00$$

Rezanje, postavitve in vezanje mrežne armature:

$c_L = 10,00$  €/h; za višino opaževanja konstrukcije do 6 m  $k_{rh} = 1,0$ ; za horizontalno betonsko ploščo  $k_{ri} = 1,0$ ; gostota jekla  $\rho_s = 7850$  kg/m<sup>3</sup>; volumen mrežne armature  $V_r = 0,0263$  m<sup>3</sup>; uporabna površina betonske plošče  $A_{cs} = 67,00$  m<sup>2</sup>; čas rezanja, postavitve in vezanja mrežne armature  $T_r = 5,2004 \times 10^{-2} \cdot (\rho_s \cdot V_r / A_{cs})^{0,6814} = 0,0242$  h/kg

$$C_{L,r} = c_L \cdot k_{rh} \cdot k_{ri} \cdot T_r \cdot \rho_s \cdot V_r = 49,86$$

Betoniranje plošče:

$c_L = 10,00$  €/h; volumen betona  $V_c = 9,3800$  m<sup>3</sup>;

debelina armiranobetonske plošče  $d = 14$  cm;

čas betoniranja plošče z betonsko črpalko  $T_c = 2,4000 \times 10^{-3} \cdot d^2 - 5,4000 \times 10^{-2} \cdot d + 9,9500 \times 10^{-1} = 0,709$  h/m<sup>3</sup>

$$C_{L,c} = c_L \cdot T_c \cdot V_c = 66,54$$

Konsolidacija betona:

$c_L = 10,00$  €/h; uporabna površina betonske plošče  $A_{cs} = 67,00$  m<sup>2</sup>; vibracijska igla  $\varnothing 48$  mm;

čas, potreben za ustrezno konsolidacijo betona z vibracijskimi iglami  $T_v = 0,20$  h/m<sup>2</sup>

$$C_{L,v} = c_L \cdot T_v \cdot A_{cs} = 134,00$$

Nega betona:

$c_L = 10,00$  €/h; volumen betona  $V_c = 9,3800$  m<sup>3</sup>;

nega betona s polivanjem vode; betoniranje plošče, izvedeno pri  $20^\circ\text{C}$  temperature okolja; čas, potreben za nego betona  $T_{cc} = 0,20$  €/m<sup>3</sup>

$$C_{L,cc} = c_L \cdot T_{cc} \cdot V_c = 18,76$$

# PROCESI ČIŠČENJA TEHNOLOŠKIH ODPADNIH VODA Z NARAVNIMI IONSKIMI IZMENJEVALCI

## PROCESSES OF CLEANING OF TECHNOLOGICAL WASTEWATER WITH NATURAL IONIC EXCHANGERS

**dr. Darko Drev, univ. dipl. inž. kem.**

UL – FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana

**prof. dr. Peter Bukovec, univ. dipl. inž. kem.**

UL – FKKT, Aškerčeva 5, 1000 Ljubljana

**izr. prof. dr. Jože Panjan, univ. dipl. inž. grad.**

UL – FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana

**Znanstveni članek**

UDK 628.34 : 546

**Povzetek** | Odpadne vode, ki se težko čistijo s konvencionalnimi čistilnimi napravami, se lahko čistijo tudi z naravnimi ionskimi izmenjevalci. Takšni materiali imajo sposobnost kemijskega vezanja raztopljenih snovi v obliki kationov (kovine, amonijev ion, itd.) in vezanje raznih drugih nečistoč na podlagi adsorpcije. Z dodajanjem takšnih dodatkov nastane sicer nekoliko večja količina odpadkov kot z nekaterimi drugimi snovmi (flokulanti, koagulantni), vendar pa je nastali produkt relativno stabilen glede vezave kovin in zaradi tega manj problematičen odpad. Glavna prednost pri uporabi tovrstnih materialov pa je predvsem nizka cena in sposobnost relativno učinkovitega odstranjevanja kovinskih ionov.

**Summary** | The use of natural ion exchangers in traditional technological wastewater treatment plants can improve wastewater treatment outcomes. Such materials have the ability to chemically bond with dissolved materials in the form of cations (metals, ammonium ion, etc) and to chemically bond with other types of impurities by adsorption. Introducing natural ion exchangers in the form of powder additives into the wastewater treatment process results in an increase in waste quantity, but it also results in more chemically stable waste. The main advantages that call for using such materials in wastewater treatment are their compatibility with existing technological equipment, the forming of non-problematic waste results, and the materials' cost effectiveness.

### 1 • UVOD

Tehnoloških odpadnih voda pogosto ni možno očistiti z biološkimi čistilnimi napravami. Razlog za to je lahko njihova sestava, ki zavira biokemijske razgradne procese. Zelo pogosto vsebujejo tehnološke odpadne vode kovinske ione, sulfate, kloride, fluoride in še nekatere druge snovi, ki niso biološko razgradljive. Tudi amoniak je v preveliki koncentraciji strup za bakterijsko združbo na biološki

čistilni napravi. Podobno velja tudi za preveč kisle ali bazične odpadne vode. Takšne odpadne vode nastajajo v različnih industrijskih obratih, posebno še v kovinskopredelovalni industriji. Tudi izcedne vode iz deponij so lahko precej obremenjene s kovinskimi ioni in amoniakom. Če želimo ustrezno očistiti takšne odpadne vode, moramo na začetku uporabiti ustrezno stopnjo predhodnega

čiščenja in šele nato jih je možno dokončno očistiti na ustrezni biološki čistilni napravi. Tehnološke čistilne naprave pa so lahko pogosto že same dovolj učinkovite in ne potrebujejo dodatnega biološkega čiščenja. Med takšne nedvomno sodijo membranske čistilne naprave, ki imajo lahko sposobnost popolnega čiščenja. Bolj pogoste so čistilne naprave, ki imajo na začetku eno ali dve stopnji mehansko – kemijskega čiščenja, nato pa stopnjo, ki odpadno vodo dokončno očisti. V to skupino tehnoloških postopkov spadajo tudi naravni ionski izmenjevalci, ki imajo

sposobnost kemijskega vezanja kovinskih ionov in amonijaka ter tudi relativno veliko sposobnost adsorpcije raznih koloidnih delcev. Vse glinice in glinam podobni materiali

imajo bolj ali manj izražene te lastnosti. Težava teh materialov je v tem, da imajo omejeno sposobnost vezanja nečistoč. Zato je zelo pomembno, da izberemo materiale,

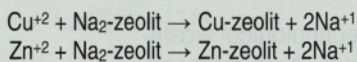
pri katerih je učinek čiščenja največji in je tudi kapaciteta vezanja nečistoč velika. Pri takšnih zahtevah se nam izbira materialov omeji na zeolite in njim podobne materiale.

## 2 • OPIS FIZIKALNIH IN KEMIJSKIH LASTNOSTI IONSKIH IZMENJEVALCEV

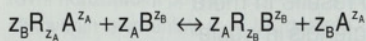
Med anorganske ionske izmenjevalce štujemo različne naravne glinene materiale, ki imajo sposobnost ionske izmenjave, ter sintetične anorganske materiale. Kot naravna ionska izmenjevalca sta najbolj poznana bentonit in zeolit (preglednica 1). Naravni materiali, ki se uporabljajo kot ionski izmenjevalci, imajo običajno amorfnost strukturo, medtem ko imajo sintetični mikrokristalinično strukturo. Čiščenje vode s tovrstnimi materiali ne poteka samo z ionsko izmenjavo, temveč tudi s fizikalnim vezanjem (adsorpcijo). Na sliki 1 je primer zgradbe sintetičnega zeolita.

Zeoliti imajo sposobnost vezanja ionov in molekul, kot na primer: ionov težkih kovin (Pb, Cd, Zn, Cr, Ni, Hg, itd.), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, H<sub>2</sub>S, Cl<sub>2</sub>, itd. Aktivne glinice in bentoniti imajo prav tako sposobnost vezanja različnih ionov, vendar so te lastnosti običajno nekoliko slabše izražene kot pri zeolitih.

Primer vezanja bakra in cinka na zeolitno strukturo sintetičnega zeolita:



Kapaciteta in selektivnost izmenjevalcev (Obal, 1993) je odvisna od splošne enačbe izmenjave ionov:



kjer sta Z<sub>A</sub>, Z<sub>B</sub> - valenci izmenjave ionov A in B

Pri teoretičnih študijah je selektivnost izmenjevalca definirana s koeficientom selektivnosti, ki vsebuje tudi ionski naboj:

$$K_A^B = \frac{(C_B)_r^{z_A} \cdot (C_A)_s^{z_B}}{(C_A)_r^{z_B} \cdot (C_B)_s^{z_A}} \quad (1)$$

tukaj pomenijo

(C<sub>B</sub>)<sub>r</sub> – koncentracija iona B v izmenjevalcu (mg/l)

(C<sub>B</sub>)<sub>s</sub> – koncentracija iona B v raztopini (mg/l)

(C<sub>A</sub>)<sub>r</sub> – koncentracija iona A v izmenjevalcu (mg/l)

(C<sub>A</sub>)<sub>s</sub> – koncentracija iona A v raztopini (mg/l)

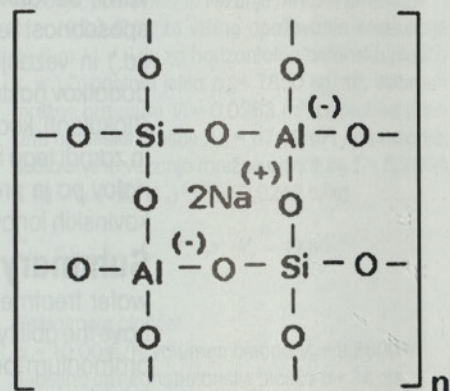
Z<sub>A</sub>, Z<sub>B</sub> – naboj ionov ( )

| zeolit        | kemijska sestava   | poroznost (%) | kapaciteta (mekv/100 g) | dominantni kation |
|---------------|--|---------------|-------------------------|-------------------|
| Analcim       | Na <sub>16</sub> (Al <sub>16</sub> Si <sub>32</sub> O <sub>96</sub> ) · 16 H <sub>2</sub> O  | 18            | 454                     | Na                |
| Filipsit      | (Ca <sub>0,5</sub> Na, K) <sub>6</sub> (Al <sub>6</sub> Si <sub>10</sub> O <sub>32</sub> ) · 12 H <sub>2</sub> O                     | 31            | 387                     | Ca ali Na, K      |
| Laumontit     | Ca <sub>4</sub> (Al <sub>6</sub> Si <sub>16</sub> O <sub>48</sub> ) · 16 H <sub>2</sub> O  | 34            | 425                     | Ca                |
| Erionit       | (Ca, Mg, K <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> ) <sub>4,5</sub> (Al <sub>6</sub> Si <sub>27</sub> O <sub>72</sub> ) · 27 H <sub>2</sub> O | 35            | 312                     | Ca ali Na, K      |
| Chabazit      | Ca <sub>2</sub> (Al <sub>16</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>24</sub> ) · 13 H <sub>2</sub> O  | 47            | 381                     | Ca ali Na         |
| Natrolit      | Na <sub>16</sub> (Al <sub>16</sub> Si <sub>24</sub> O <sub>80</sub> ) · 16 H <sub>2</sub> O  | 23            | 526                     | Na                |
| Mordenit      | Na <sub>8</sub> (Al <sub>8</sub> Si <sub>40</sub> O <sub>96</sub> ) · 24 H <sub>2</sub> O  | 28            | 229                     | Ca ali Na         |
| Klinoptilolit | Na <sub>6</sub> (Al <sub>6</sub> Si <sub>30</sub> O <sub>72</sub> ) · 24 H <sub>2</sub> O  | 34            | 254                     | Na                |

Preglednica 1 • Sestava in lastnosti nekaterih naravnih zeolitov (Obal, 1991)

Poleg sposobnosti vezanja nečistoč iz odpadne vode na podlagi ionske izmenjave imajo naravni ionski izmenjevalci tudi veliko sposobnost fizikalnega vezanja nečistoč z adsorpcijo. Medmolekularne privlačne sile so pri običajnem substratu zelo majhne, zato je adsorpcija zanemarljiva. Pri specialnih substratih pa so lahko te sile bistveno večje. Najbolj poznani površinsko aktivni materiali so: aktivno oglje, diatomejska zemlja, azbest, razni tipi polisilicijevih kislin (Kieselgur), itd.

Te privlačne sile se lahko kažejo navzven kot pozitivni ali negativni elektrokinetični potencial (zeta potencial) ali v drugi obliki. Površinsko aktivni material ima pozitivni elektrokinetični potencial. Molekule, ki jih adsorbiramo (bakterije, itd.), imajo negativni elektrokinetični potencial. Adsorbirana plast je praviloma enomolekularna, zato zahtevamo od adsorbenta izredno veliko aktivno površino. Pri aktivnem oglju mora biti vsaj 1000 m<sup>2</sup>/g aktivne površine. Podobne zahteve veljajo tudi za druge površinsko aktivne materiale. V kapilarnih sistemih adsorbenta prihaja do interakcije med dvema slojema adsorbirane materiala na nasprotnih straneh in do kapilarne kondenzacije. V kapilarah in notranjih vogalih aktivne površine se zato adsorbira veliko večja količina materiala kot na odprtih površinah, kjer je plast praviloma enomolekularna. V odvisnosti od snovi, ki jo adsorbiramo, in adsorbenta, je lahko plast eno-, dvo- ali pa tudi večmolekularna. Več-



Slika 1 • Primer zgradbe sintetičnega zeolita s formulo Na<sub>x</sub>((AlO<sub>2</sub>)<sub>x</sub>(SiO<sub>2</sub>)<sub>y</sub>) x zH<sub>2</sub>O

molekularne plasti so redkejšje, zato pri izračunih v glavnem upoštevamo enomolekularne plasti. Večmolekularne plasti so predvsem rezultat sil, ki delujejo na večje razdalje. Adsorpcijski potencial je odvisen od vrste filtrirnega medija in od snovi, ki se filtrira (Drev, 2004).

$$E = \left[ \frac{(n^2 - 1)}{(n^2 + 2)_s} - \frac{(n^2 - 1)}{(n^2 + 2)_i} \right] \quad (2)$$

Čas pretoka pa je enak:

$$t = \frac{N_0}{C_0 V} \left[ X - \frac{V_s}{k \cdot N_0} \ln \left( \frac{C}{C_0} - 1 \right) \right] \quad (3)$$



Tu pomenijo:

- $n$  – refrakcijski indeks (-)
- $V_s$  – molekularni volumen polutanta ( $\text{cm}^3$ )
- $t$  – čas pretoka (min)
- $N_0$  – adsorpcijska kapaciteta (-)
- $C_0$  – koncentracija polutanta na dotoku ( $\text{g/l}$ )
- $C_B$  – koncentracija polutanta na iztoku ( $\text{g/l}$ )
- $X$  – debelina sloja (mm)
- $V_l$  – linearno pretočno razmerje
- $k$  – adsorpcijska konstanta

S pomočjo Kelvinove enačbe se lahko določi mikroprozna struktura:

$$D_p = \frac{4 \cdot \sigma \cdot V \cdot \cos \theta}{RT \cdot \ln \frac{P}{P_0}} \quad (4)$$

Tu pomenijo:

- $D_p$  – premer por (mm)
- $\sigma$  – površinska napetost adsorbirane vode ( $\text{J/m}^2$ )
- $V_m$  – molarni volumen adsorbirane vode ( $\text{cm}^3$ )
- $\theta$  – kot med ogljem in vodo (rad)
- $R$  – plinska konstanta ( $\text{J/mol K}$ )
- $T$  – absolutna temperatura ( $^{\circ}\text{K}$ )
- $P$  – pritisk vodne pare (bar)
- $P_0$  – pritisk zasičene vodne pare (bar)

Različni substrati imajo različne sposobnosti vezanja nečistoč. Po Freundlicu se lahko izračuna količina adsorbirane substance po naslednji formuli:

| zap. št. | Adsorbent                 | pH  | $^{\circ}\text{C}$ | $A_0$ | $1/n$ |
|----------|---------------------------|-----|--------------------|-------|-------|
| 1        | aktivno oglje             | 7,0 | 10                 | 78,60 | 0,27  |
| 2        | diatomejska zemlja        | 7,0 | 10                 | 0,33  | 0,62  |
| 3        | glina                     | 7,0 | 10                 | 0,18  | 0,61  |
| 4        | aluminijev hidroksid      | 7,0 | 10                 | 0,27  | 0,73  |
| 5        | Bacillus subtilis         | 7,0 | 25                 | 8,92  | 0,68  |
| 6        | bakterijska združba iz ČN | 7,0 | 25                 | 0,89  | 0,96  |
| 7        | E. coli                   | 7,0 | 25                 | 1,28  | 0,80  |

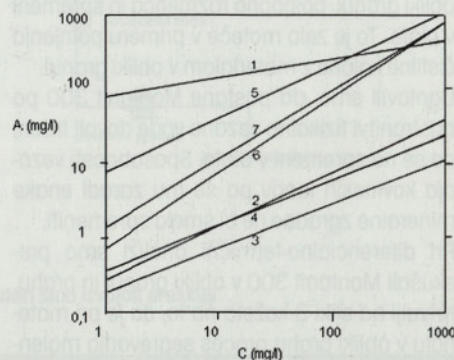
Preglednica 2 • Adsorpcijske karakteristične vrednosti za posamezne vrste materialov (Gründer, 2000)

$$A = A_0 \cdot C^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

kjer so:

- $A$  – adsorbirana količina substance ( $\text{mg/g}$ )
- $A_0, 1/n$  – karakteristične vrednosti za posamezne materiale (preglednica 2)
- $C$  – ravnotežna koncentracija ( $\text{mg/l}$ )

Iz slike 2 je razvidno, da so precejšnje razlike med materiali. Aktivno oglje ima največjo sposobnost odstranjevanja tenzidov v vodi z nizkimi in velikimi koncentracijami. Diatomejska zemlja, ki se pogosto uporablja za čiščenje tekočin, pa ima bistveno slabšo sposobnost adsorpcije tenzidov in je njena sposobnost veliko bolj odvisna od koncentracije. Velike sposobnosti adsorpcije imata tudi Bacillus



Slika 2 • Prikaz sposobnosti zadrževanja tenzidov na materiale iz preglednice 2

subtilis in E. coli, kar kaže na to, da je verjetno dovolj velika adsorpcijska sposobnost tudi pri biomasi (pritrjeni ali plavajoči) v bioloških čistilnih napravah.

### 3 • MATERIALI IN METODE

Izvedli smo laboratorijske preskuse in preskave na industrijski čistilni napravi, in sicer na montanitu 300. Njegova kemijska in mineralna sestava je naslednja:

**Kemijska sestava**

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| $\text{SiO}_2$          | 62,95 % |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 15,92 % |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 3,21 %  |
| $\text{CaO}$            | 3,82 %  |
| $\text{MgO}$            | 1,81 %  |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 1,72 %  |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 3,26 %  |
| $\text{SO}_3$           | 0,03 %  |
| l.o.i.                  | 7,19 %  |

**Mineralna sestava:**

|             |      |
|-------------|------|
| zeloliti    | 44 % |
| kremen      | 34 % |
| kristobalit | 7 %  |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| amorfnost stekla                  | 6 % |
| plagioklaz                        | 5 % |
| iliti, muskovit                   | 5 % |
| v sledovih: apatit, kalcit, rutil |     |

**Izmenjevalna kapaciteta:**

|                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| $\text{NH}_4^+$  | $98 \pm 5$ mekv / 100 g |
| $\text{K}^+$     | $66 \pm 3$ mekv / 100 g |
| $\text{Ca}^{+2}$ | $49 \pm 2$ mekv / 100 g |

Montanit 300 je naravni zeolit, ki ga kopljejo v Zaloški Gorici pri Celju. Testiranje čistilne sposobnosti pri tehnološki odpadni vodi, močno obremenjeni s kovinami, pa je potekalo po naslednjih standardih:

- Odvzem vzorcev je potekal po SIST ISO 5667-10 in SIST ISO 56767-16
- Temperatura je bila merjena po SIST DIN 38404-4

- pH vrednost je bila merjena po SIST ISO 10523
- Konzerviranje vzorcev je potekalo po SIST EN ISO 5667-3
- Neraztopljene snovi so bile določene po SIST ISO 1193
- Usedljive snovi so bile določene po DIN 38409-9
- Baker je bil določen po SIST ISO 8288, sekc. 1, plamenska tehnika
- Cink je bil določen po SIST ISO 8288, sekc. 1, plamenska tehnika
- Kadmij je bil določen po SIST ISO 5961, sekc. 1, plamenska tehnika
- Nikelj je bil določen po SIST ISO 8288, sekc. 1, plamenska tehnika

Z diferencialno termično kalorimetrijo z aparaturou METTLER STAR SW 8.01 smo ugotavljali obnašanje Montanita 300, ki je bil v praškasti obliki in v obliki granul. Hitrost segrevanja je bila  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

## 4 • IZVEDBA PRESKUSOV IN REZULTATI

### Termična analiza

Obnašanje Montanita 300 pri segrevanju smo ugotavljali z diferencialno termično analizo. S to preiskavo smo ugotavljali, do katere temperature se iz materiala izloča fizikalno vezana voda ter do kakšne temperature še ostane mineralna sestava stabilna. Razlog za takšno preiskavo je mehansko slabo stabilen naravni material, ki se v primeru, da je v obliki granul, postopno razmešča in spremeni v blato. To je zelo moteče v primeru polnjenja čistilne kolone z materialom v obliki granul. Ugotovili smo, da postane Montanit 300 po odstranitvi fizikalno vezane vode dovolj trden, da se ne spremeni v blato. Sposobnosti vezanja kovinskih ionov pa se mu zaradi enake mineralne zgradbe ne bi smela spremeniti. Pri diferencialno-termični analizi smo preiskovali Montanit 300 v obliki granul in prahu. Krivulji na sliki 3 kažejo na to, da je pri materialu v obliki prahu proces segrevanja malenkost hitrejši.

Iz slike 3 je razvidno, da se izloči vsa vezana vlaga v temperaturnem območju med 100 in 250 °C. Od 250 °C pa vse do 800 °C ostane Montanit 300 stabilen. Mineralna zgradba se mu očitno ne spremeni, kar pomeni, da obdrži absorpcijske sposobnosti vezanja kovinskih ionov, amonijevih ionov, itd.

Toplotno obdelan material na temperaturi med 250 °C in 800 °C postane mehansko veliko bolj trden in ga je težko mehansko zdrobiti. Prav tako se v vodi ne razmešča in ne spremeni v blato. Ker rezultati preiskave na sliki 4 kažejo, da razen odstranjevanja fizikalno vezane vlage ne pride do spremembe struk-

ture, so lahko nastale granule primerno polnilo za čistilne kolone.

### Laboratorijski preskusi čiščenja

S preskusi smo želeli ugotoviti, ali izbrani tip zeolita Tufko (Montanit 300) dovolj učinkovito odstranjuje tudi težke kovine. Ker so na izbranem zeolitu iz Zaloške gorice pri Celju razne institucije že izvedle veliko preiskav, je bil namen naših preskusov samo potrditi učinkovito odstranjevanje kovinskih ionov pri danih pogojih v industriji. Preiskave, ki so jih izvedle različne institucije, so pokazale, da ima Tufko različno sposobnost vezanja posameznih kovin. Sposobnost vezanja je naslednja:  $Pb > Cu > Zn > Ni > Fe > Cr$ . Pri naših preiskavah nismo imeli namena tega potrjevati, temveč samo ugotoviti, ali je možno pri konkretnih pogojih v industriji odstranjevati težke kovine. Uporabili smo isto vrsto zeolita kot pri predhodnih pilotnih preskusih.

Kolona: 4 cm, višina 21 cm

Volumen zeolita: 240 ml

Pretok skozi kolono: 140 ml/h

pH vrednost: 6,7

S preskusi smo dokazali, da izbrani tip zeolita Tufko (Montanit 300) zelo učinkovito odstranjuje težke kovine. Učinek čiščenja bi lahko bil večji, če ne bi prišlo do delne mehanske razgradnje substrata v finejše delce. Vse neraztopljene snovi, ki so bile posledica delne mehanske razgradnje zeolita, so povzročile zvišanje vsebnosti kovin. Pri uporabljeni analitski metodi se namreč najprej izvrši razklop z zlatotopko. Pri tem se spremenijo v topno obliko tudi tisti kovinski ioni, ki so bili pred tem kemijsko vezani v zeolitu.

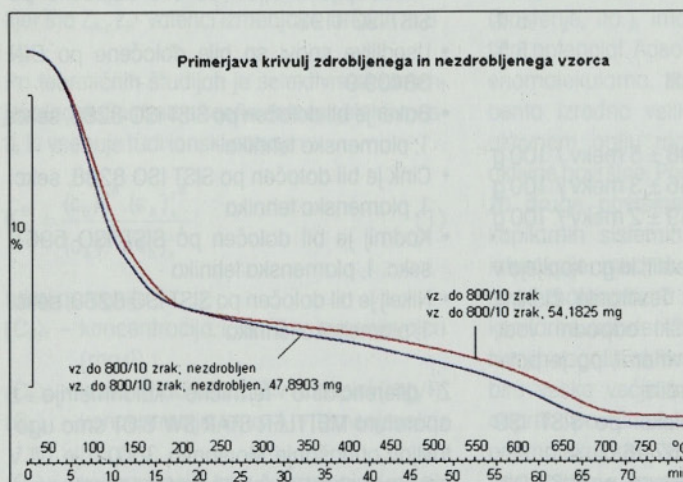
### Preskusi na industrijski čistilni napravi

Preskuse smo izvršili na industrijski čistilni napravi za čiščenje tehnološke odpadne vode iz kovinske industrije, ki ne dosega niti predpisanih kriterijev za izpust v kanalizacijo. Zaradi obstoječe tehnologije čiščenja smo uporabili zeolit v praškasti obliki in ne v obliki zrn, kot smo ga uporabili pri pilotni preiskavi. Tehnološki postopek na industrijski čistilni napravi je obsegal naslednje faze:

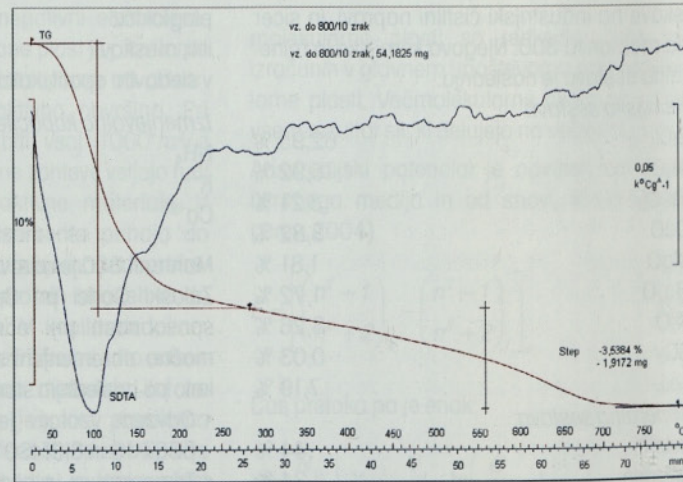
- dotok tehnoloških odpadnih vod
- egalizacijo različnih tehnoloških odpadnih vod
- nevtralizacijo odpadne vode
- postopno dodajanje substrata v nevtralizacijski bazen, kjer poteka intenzivno mešanje

| parametri | enota   | vsebnost na dotoku | vsebnost na iztoku | učinek čiščenja (%) |
|-----------|---------|--------------------|--------------------|---------------------|
| svinec    | mg Pb/l | 0,10               | 0,01               | 90                  |
| baker     | mg Cu/l | 0,10               | 0,01               | 90                  |
| cink      | mg Zn/l | 0,10               | 0,01               | 90                  |
| niklja    | mg Ni/l | 0,10               | 0,01               | 90                  |

Preglednica 3 • Učinek odstranjevanja kovinskih ionov iz odpadne vode



Slika 3 • Primerjava krivulj zdrobljenega in nezdobljenega vzorca



Slika 4 • Krivulja termične analize zeolita

- sedimentacija substrata in črpanje na filterno stiskalnico
- iztok očiščene odpadne vode iz filterne stiskalnice v kanalizacijo

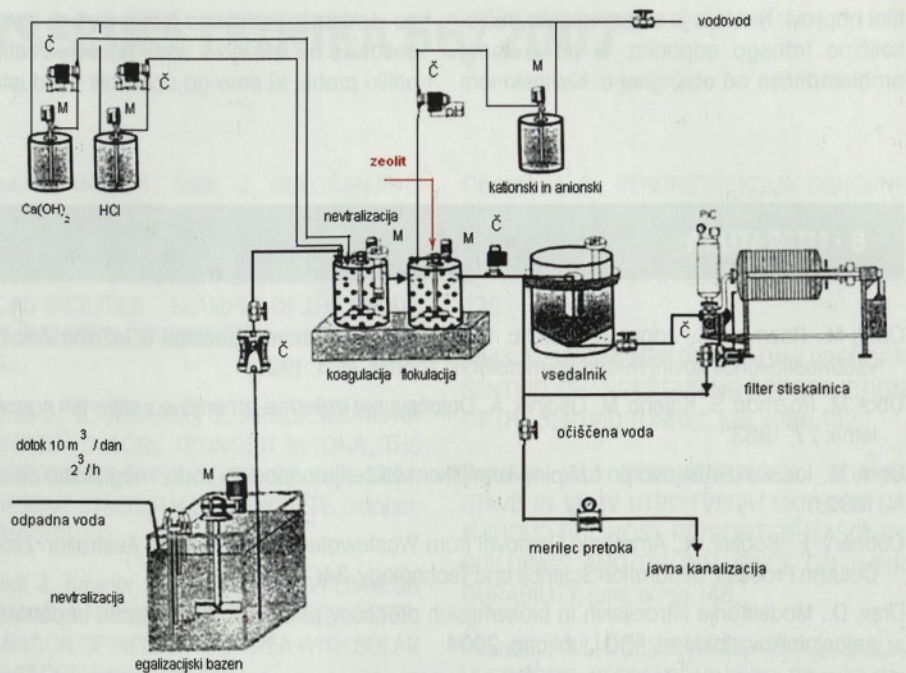
Preskus je trajal tri dni. Vsak dan se je na čištilno napravo postopno doziral 80 kg zelolita.

Dnevna količina odpadne vode je bila ca.  $10 \text{ m}^3$

Substrat: Tufko (Montanit 300) iz Zaloške Gorice pri Celju

V preglednici št. 4 so podani rezultati povprečnih tri dnevni vzorcev na dotoku in iztoku iz čištilne naprave. Dnevna nihanja pH vrednosti in vsebnosti posameznih parametrov so bila na dotoku precejšnja, na iztoku pa so se zaradi predhodne egalizacije umirila. Iz preglednice je razvidno, da naravni zeolit nima samo veliko sposobnost vezanja raztopljenih kovinskih ionov, temveč veže tudi precej organskih nečistoč. Odstranjevanje organskih nečistoč je verjetno posledica vezanja koloidnih delcev z adsorpcijo. Učinek čiščenja bi bil verjetno še večji, če bi bilo zagotovljeno učinkovitejše odstranjevanje trdnih delcev. Neraztopljene snovi na iztoku so namreč prispevale dodatni delež kovinskih ionov, ki so sicer kemijsko vezani. Priprava vzorca za kemijsko preiskavo ima namreč na začetku tudi razklop z zlatotopko. Pri tem preide v topno obliko tudi neraztopljeni del kovin.

Pri tem preskusu ni bilo biokemijskih procesov razgradnje, temveč je bilo čiščenje le posledica kemijskih in fizikalnih procesov.



Slika 5 • Prikaz industrijske čištilne naprave, na kateri smo izvajali preskus

| Parametri           | enote                | dotok | iztok | učinek čiščenja (%) |
|---------------------|----------------------|-------|-------|---------------------|
| pH vrednost         |                      | 1,75  | 7,04  |                     |
| neraztopljene snovi | mg/l                 | 354   | 18    | 95                  |
| usedljive snovi     | ml/l                 | 4,0   | 0,0   | 100                 |
| KPK                 | mg O <sub>2</sub> /l | 1203  | 12    | 99                  |
| baker               | mg Cu/l              | 78    | 0,78  | 99                  |
| cink                | mg Zn/l              | 330   | 5,9   | 98                  |
| kadmij              | mg Cd/l              | 1,2   | 0,96  | 20                  |
| nikelj              | mg Ni/l              | 3,9   | 3,5   | 10                  |

Preglednica 4 • Rezultati preskusa čiščenja tehnološke odpadne vode z zeolitom Tufko (Montanit 300)

## 5 • SKLEPI

Raziskave so pokazale, da je lahko naravni zeolit Montanit 300 relativno dober dodatek za izboljšanje čiščenja tehnoloških odpadnih voda, ki so onesnažene s kovinami in raznimi težko razgradljivimi organskimi nečistočami. Pri toplotni obdelavi do  $800^\circ\text{C}$  se mu mineralna sestava ne spremeni. To pomeni, da obdrži sposobnost vezanja kovinskih ionov. S segrevanjem materiala do  $250^\circ\text{C}$  se odstrani vsa fizikalno vezana voda. Material postane trden in s tem tudi primeren za polnjenje v čištilne kolone. Pri izvedenem tehnološkem preskusu smo uporabili zeolit v obliki prahu, zato nam predhodna toplotna obdelava ni bila potrebna. Pri industrijskem preskusu je bil učinek odstranjevanja bakra 99 % in cinka

98 %. Učinek čiščenja za kadmij in nikelj je bil bistveno nižji. To v konkretnem primeru ni bilo pomembno, saj je šlo predvsem za onesnaženje z bakrom in cinkom. Pri višjih koncentracijah kadmija in niklja bi bil verjetno učinek čiščenja za ta dva elementa znatno večji. To so pokazali laboratorijski preskusi, pri katerih smo imeli pri vseh kovinah enake koncentracije in smo pri bakru in niklju dosegli 90 % učinek čiščenja. Pri industrijskem preskusu smo zelo uspešno zmanjšali tudi organsko onesnaženje, ki smo ga izmerili posredno preko KPK. V konkretnem primeru je šlo v veliki meri za mineralna olja, tenzide, akrilate, itd. Čistili smo namreč odpadno vodo, ki je nastala pri preoblikovanju plo-

čevine, njenem razmaščevanju ter galvanizaciji. Vsi ti parametri se odražajo v obliki povečane vrednosti KPK. Rezultati kažejo, da se je z dodatkom naravnega zeolita zmanjšala vsebnost KPK za 99 %. Takšen učinek čiščenja KPK je presenetljivo dober. Z upoštevanjem kompletnega postopka čiščenja, ki je prikazan na sliki št. 5, pa ga je možno tudi obrazložiti. Organske nečistoče so bile prisotne predvsem v obliki koloidnih delcev. Koloidni delci so se v veliki meri adsorbirali na delce zeolita in s tem izločili iz odpadne vode. Pri filtraciji na filterni stiskalnici so se ti delci izločili iz odpadne vode in ostali v odpadku.

Pri ocenjevanju rezultatov preskusov ne smemo spregledati tudi ekonomskega vidika. V konkretnem primeru je bilo možno uspešno očistiti tehnološko odpadno vodo na obstoječi kemijsko – fizikalni industrijski čis-

tilni napravi. Nastala je sicer nekoliko večja količina trdnega odpadka, ki pa je manj problematičen od običajnega. Kovinski ioni

so v odpadku relativno trdno vezani, zaradi česar se ne izlužijo v vodi. Naravni zeolit v obliki prahu, ki smo ga uporabili v industrij-

skem preskusu, je poceni surovina, zato bi končni izračun verjetno pokazal smiselnost njegove uporabe.

## 6 • LITERATURA

- Obal, M., Rozman, S., Jager, R., Kolenc, M., Uporabnost naravnih zeolitov iz ležišča Zaloška Gorica za čiščenje odpadnih voda s povečano vsebnostjo ionov kovin, Rudarsko-metalurški zbornik, št. 4, 1991.
- Obal, M., Rozman, S., Kolenc, M., Osojnik, A., Določevanje izoterme izmenjave v sistemih naravni zeolit – raztopina kovin, Kovine, zlitine, tehnologije, letnik 27, 1993.
- Obal, M., Ionska izmenjava pri fizikalno kemijskem čiščenju odpadnih voda, magistrsko delo, oddelek za montanistiko, FNT, Univerza v Ljubljani, 1992.
- Coonery, E., Booker, N., Ammonia Removal from Wastewaters Using Natural Australian Zeolite. II Pilot – Scale Study Using Continuous Packed Column Process, Separation Science and Technology, 34(14), 1999.
- Drev, D., Modeliranje filtracijskih in biokemijskih procesov pri različnih substratih in pretokih na dimenzioniranje rastlinskih čistilnih naprav in precejalnikov, doktorat, FGG Ljubljana, 2004.
- Gründer, B., Aufrüstung von Kleinkläranlagen mit Membrantechnologie, ATV – DVWK – Bundestagungen, 123–132, 2000.
- Splitz, K., Moreno, J., A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling, John Wiley & Sons. Inc. 1996.
- Panjan, J., Disperzijski model za reaktor z vzdolžnim odtokom, Acta hydrotechnica FGG, Ljubljana, 1998.
- Gray, N.F., Water Technology, Arnold A member of Hodder Headline Group, 1999.
- Chang, I.S., Kyun Shin, P., Hong Kim, B., Biological treatment of acid mine drainage under sulphate – reducing conditions with solid waste material as substrate. Water research, Vol. 34, No. 4, pp.1269–1277, 2000.
- Vangronsveld, J., Spelmans, N., Clijsters, H., Adriansens, E., Caleer, R., Van Poucke, L., van der Lelie, D., Mergeay, M., Corbisier, P., Bierkers, J., J., Diels, L., Physico-chemical and biological evaluation of the efficacy of in situ metal incivation in contaminated soils, 2000.
- Backer, R. W., Membrane Technology and Applications, Mc Graw – Hill, 2000.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung, Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte, Schriftenreihe des IÖW 177/04, 2004.
- Zeolite Membranes, ICIM 9 Workshops, Lillehammer 2006.
- Gruett, K., The art of zeolite application, Water Technology, March 2003.
- Rehm, H., Neues Trägermaterial für die Proteinchromatographie, Laborjournal und F&R Internet Agentur, 2005.
- Pilchowski, K., Bergk, K., Wolf, F., Zum Ionenaustausch am Zeolith NaA in Gegenwart von Pentanatriumtriphosphat, Acta Hydrochimica et Hydrobiologica, Volume 12, 1984.
- International Conference on the Occorence Properties, and Utilization of Natural Zeolite, Socorro, New Mexico, USA, July 16–21, 2006.
- Stryczek, S., Gonet, A., Wiśniowski, R., Brylicki, W., The Influence of Clinoptilolite on Technological Properties of Fresh and Set Slag-Alkaline Slurries, Acta Montanistica Slovaca, Ročník 11 (2006), mimoriadne číslo 1, 198–203, 2006.
- Clark, S.E, Johnson, P., Pitt, R., Gill, S., Pratap, M., Filtration for metals removal from stromwater, 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen/Denmark, 21–26 August 2005.

# VSEBINA LETNIKA 56/2007

## Članki - Papers

Bohinc, U., Brank, B., KAKO GOSTA NAJ BO MREŽA KONČNIH ELEMENTOV PRI STATIČNI ANALIZI LINIJSKIH KONSTRUKCIJ?, HOW FINE SHOULD BE A FINITE ELEMENT MESH FOR STATIC ANALYSIS OF FRAME STRUCTURES?, januar, stran 19.

Brilly, M., Šraj, M., Vidmar, A., Padežnik, M., Horvat, A., HIDROLOŠKO-HIDROTEHNIČNA ŠTUDIJA S PRIKAZOM CELOVITE REŠITVE IN HIDROTEHNIČNIMI IZRAČUNI ZA ŠIRŠE OBMOČJE OLN ZAPOGE 1, HYDROLOGICAL AND HYDROTECHNIC STUDY PROVIDING AN OVERALL SOLUTION AND CALCULATIONS FOR THE GREATER AREA OF LOCAL DETAILED PLAN ZAPOGE 1, julij, stran 175.

Čuš, I., ČRPALNA HIDROELEKTRARNA KOZJAK, PUMPED STORAGE POWER PLANT KOZJAK, november, stran 286.

Dolenc, M., Klinc, R., Turk, Ž., InteliGrid - SEMANTIČNA GRID TEHNOLOGIJA ZA PODPORO INŽENIRSKIM VIRTUALNIM ORGANIZACIJAM, InteliGrid - SEMANTIC GRID TECHNOLOGY IN SUPPORT OF ENGINEERING VIRTUAL ORGANISATIONS, november, stran 297.

Drev, D., Bukovec, P., Panjan, J., PROCESI ČIŠČENJA TEHNOLOŠKIH ODPADNIH VODA Z NARAVNIMI IONSKIMI IZMENJEVALCI, PROCESSES OF CLEANING OF TECHNOLOGICAL WASTEWATER WITH NATURAL IONIC EXCHANGERS, december, stran 333.

Gosar, L., Rak, G., Steinman, F., Banovec, P., Z LIDAR TEHNOLOGIJO ZAJETA TOPOGRAFIJA V HIDRAVLIČNIH ANALIZAH VODOTOKOV, USING LIDAR DATA IN OPEN CHANNEL HYDRAULIC ANALYSIS, maj, stran 115.

Hozjan, T., Bratina, S., Srpčič, S., NELINEARNA POŽARNA ANALIZA JEKLENIH OKVIRNIH KONSTRUKCIJ, NONLINEAR FIRE ANALYSIS OF STEEL FRAME STRUCTURES, april, stran 86.

Kilar, V., Koren, D., POTRESNA IZOLACIJA STAVB KOT ALTERNATIVA ZA GRADNJO NA POTRESNIH OBMOČJIH, SEISMIC ISOLATION OF BUILDINGS AS AN ALTERNATIVE FOR BUILDING IN EARTHQUAKE PRONE AREAS, december, stran 307.

Klanšek, U., Kravanja, S., STROŠKOVNO OPTIMIRANJE SOVPREŽNIH KONSTRUKCIJ IZ BETONA IN JEKLA - 1. DEL: ANALIZA LASTNIH IZDELAVNIH STROŠKOV, december, stran 319.

Kne, A., Marc, K., Šelih, J., ODLOČANJE O VZDRŽEVANJU CESTNIH OBJEKTOV - PRIMER SKUPINE NADVOZOV NAD AVTOCESTO, DECISION ON THE REHABILITATION OF THE ROAD FACILITIES - EXAMPLE OF THE GROUP OF HIGHWAY CROSSOVERS, oktober, stran 254.

Korošak, B., Šušteršič, J., APROKSIMATIVNA FUNKCIJA TLAČNE TRDNOSTI BETONA, THE APPROXIMATIVE FUNCTION OF THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE, oktober, stran 263.

Kristl, Ž., Krainer, A., DOLOČANJE VPLIVNEGA OBMOČJA S SONČNO OVOJNICO, DETERMINATION OF INFLUENTIAL AREA WITH SOLAR ENVELOPE, junij, stran 156.

Lutar, B., UPORABA 3D MODELIRNIKOV, USE OF 3D MODELERS, januar, stran 2.

Lutar, B., UPORABA HITRE IZDELAVE PROTOTIPOV IN 3D TISKANJA V GRADBENIŠTVU, USE OF RAPID PROTOTYPING AND 3D PRINTING IN CONSTRUCTION, april, stran 95.

Maleiner, F., RAČUNALNIŠKI SISTEM UPRAVLJANJA IN VODENJA OBRATOVANJA KANIO®, COMPUTERIZED MAINTENANCE MANAGEMENT SYSTEM KANIO®, marec, stran 63.

Maleiner, F., UPORABA POLŽASTIH ČRPALK V KANALIZACIJSKIH OMREŽJIH, THE USE OF SCREW PUMPS IN SEWER SYSTEMS, avgust, stran 198.

Markelj, V., MOST ČEZ DRAVO NA PTUJU - ZASNOVA KONSTRUKCIJE, BRIDGE OVER THE DRAVA RIVER IN PTUJ - CONCEPTUAL DESIGN, oktober, stran 244.

Markelj, V., PROJEKT MOSTU PREKO SAVE V BEOGRADU, DESIGN OF THE BRIDGE OVER SAVA RIVER IN BELGRADE, marec, stran 54.

Mikoš, M., UPRAVLJANJE TVEGANJ IN NOVA EVROPSKA DIREKTIVA O POPLAVNIH TVEGANJIH, RISK MANAGEMENT AND THE NEW EUROPEAN DIRECTIVE ON FLOOD RISKS, november, stran 278.

Može, P., Lopatič, J., Beg, D., PROJEKTNA NOSILNOST OSABLJENIH PREREZOV ELEMENTOV IZ JEKEL VISOKE TRDNOSTI, DESIGN NET CROSS-SECTION RESISTANCE OF ELEMENTS MADE OF HIGH STRENGTH STEEL, maj, stran 124.

Obradović, Đ., REKONSTRUKCIJA OSNOVNE ŠOLE IVAN CANKAR V LJUTOMERU, RECONSTRUCTION OF IVAN CANKAR ELEMENTARY SCHOOL IN LJUTOMER, maj, stran 135.

Popit, A., SPREMEMBE PRI GRADNJI PREDORA ŠENTVID, CHANGES DURING CONSTRUCTION OF THE ŠENTVID TUNNEL, julij, stran 182.

Popović, M., REKONSTRUKCIJA ZIDANIH STAVB IN VPLIV UTRDITVENIH UKREPOV NA NJIHOVO TRAJNOST, RETROFIT OF MASONRY BUILDINGS AND ITS INFLUENCE ON THEIR DURABILITY, junij, stran 146.

Pšunder, I., OCENJEVANJE ZMANJŠANJA VREDNOSTI NEPREMIČNINSKIH PRAVIC ZARADI PRAVICE STVARNE SLUŽNOSTI, KI JE USTANOVLJENA ZA DOLOČEN ČAS, APPRAISAL OF REAL ESTATE DIMINISHED VALUE DUE TO LIMITED PERIOD REAL EASMENT, januar, stran 15.

Rismal, M., ALI JE AKUMULACIJA SUHORKA POTREBNA?, IS THE WATER RESERVOIR SUHORKA NECESSARY?, avgust, stran 209.

Rojc, T., O MULTIPLIKATIVNI TEORIJI HIPERELASTO-PLASTIČNIH TELES PRI VELIKIH DEFORMACIJAH IN OBJEKTIVNOSTI NUMERIČNIH ALGORITMOV, II. DEL: INTEGRACIJSKI ALGORITMI, USE OF MULTIPLICATIVE THEORY OF HYPERELASTO-PLASTIC BODIES AT LARGE STRAINS AND OBJECTIVITY OF NUMERICAL ALGORITHMS, PART II: INTEGRATION ALGORITHMS, marec, stran 68.

Sinur, F., Beg, D., TORZIJSKA ODPORNOST VZDOLŽNIH IN PREČNIH OJAČITEV POLNOSTENSKIH NOSILCEV, TORSIONAL RESISTENCE OF LONGITUDINAL AND TRANSVERSAL STIFFENERS IN PLATE GIRDERS, avgust, stran 186.

Tajnik, M., Dobrila, P., Premrov, M., PRIMERJALNA ANALIZA SOVPREŽNEGA T-PREREZA IZ BETONA IN LESA, OJAČENEGA S CFRP TRAKOM, COMPARISON ANALYSIS OF COMPOSITE T-SECTION MADE OF CONCRETE AND TIMBER, STRENGTHENED WITH CFRP STRIP, september, stran 218.

Tollazzi, T., MONTAŽNO KROŽNO KRIŽIŠČE, ASSEMBLED ROUNDABOUT, november, stran 291.

Trtnik, G., Kavčič, F., Turk, G., NUMERIČNI MODEL ZA DOLOČANJE TLAČNE TRDNOSTI MLADEGA BETONA Z ULTRAZVOČNO METODO, NUMERICAL MODEL FOR DETERMINATION OF COMPRESSIVE STRENGTH OF YOUNG CONCRETE WITH ULTRASONIC PULSE VELOCITY METHOD, september, stran 226.

Urevec, A., UPRAVLJANJE Z JEZEROM – PRIMERJAVA BLEDA S PODOBNIMI KRAJI V AVSTRIJI, LAKE MANAGEMENT – COMPARISON BETWEEN BLED AND AUSTRIAN LOCATIONS, julij, stran 166.

### Jubileji

DGIT Celje, Leander Litera, prof., univ. dipl. inž. grad., 80 let, april, stran 82.

Duhovnik, J., doc. dr. Janez Reflak, univ. dipl. inž. grad. – 70 let, februar, stran 30.

Tomažević, M., Franc Čačovič osemdesetletnik, maj, stran 114.

### Odmev

Maleiner, F., Pripombe k članku A. Urevca: Upravljanje z jezerom – primerjava Bleda s podobnimi kraji v Avstriji, september, stran 235.

Urevec, A., Odgovor avtorja, september, stran 236.

Kranjc, U., Ali je akumulacija Suhorka potrebna? Drugo mnenje, oktober, stran 270.

### Srečno 2008

Vrbek, M., Novoletno voščilo predsednika ZDGITS, december, stran 306.

### Nagrajeni gradbeniki

Nagrade Inženirske zbornice Slovenije, oktober, stran 242.

Prešernove nagrade študentom FGG UL, april, stran 83.

### Navodila avtorjem za pripravo prispevkov

V vsaki številki, stran 2 ovitka.

### Razpored seminarjev za strokovne izpite

Holobar, A., januar, stran 28.

Holobar, A., avgust, stran 216.

Holobar, A., december, stran 3 ovitka.

### Novi diplomanti gradbeništva

Juteršek, J., januar, stran 3 ovitka; marec, stran 3 ovitka; april, stran 3 ovitka; maj, stran 140; junij, stran 3 ovitka; avgust, stran 3 ovitka; oktober, stran 3 ovitka; november, stran 3 ovitka.

### Obvestilo in vabilo diplomantom FGG UL

februar, stran 52; junij, stran 163; avgust, stran 219.

### Vabila na strokovne prireditve

8. dan jeklenih konstrukcij, maj, stran 3 ovitka.

18. Mišičev vodarski dan, oktober, stran 276.

29. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, julij, stran 196; avgust, stran 220.

Seminar o evrokodih – prvo obvestilo, februar, stran 3 ovitka.

Tesnenje ravnih streh s trakovi iz umetne mase, september, stran 237.

### Druga vabila

Klub diplomantov fakultete za gradbeništvo in geodezijo v ustanavljanju, Vabilo k vpisu, januar, stran 26.

Redna skupščina ZDGITS, april, stran 112.

### Poročilo s strokovnih prireditev

Avšič, F., Juvan, S., Mišičev vodarski dan 2006 v Mariboru, januar, stran 24.

Lopatič, J., 28. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, februar, stran 52.

### Razpisi

Gospodarska zbornica Slovenije, Združenje za kovinsko industrijo, Odbor za jeklene konstrukcije, Razpis za podelitev nagrade za najboljši dosežek na področju projektiranja in izgradnje jeklenih konstrukcij za leto 2007, januar, stran 25.

Nagrada IZS za inovativnost, avgust, stran 208.

### Koledar prireditev

Juteršek, J., januar, stran 4 ovitka; februar, stran 4 ovitka; marec, stran 4 ovitka; april,

stran 4 ovitka; maj, stran 4 ovitka; junij, stran 3 ovitka; julij, stran 4 ovitka; september, stran 238; oktober, stran 4 ovitka; november, stran 4 ovitka; december, stran 4 ovitka.

### Vabilo za objavo oglasov

Holobar, A., marec, stran 80.

Holobar, A., september, stran 239.

### Vsebina letnika 56/2007

december, stran 339.

### Novice iz društev in ZDGITS

Redna skupščina ZDGITS, april, stran 112.

Volilna skupščina 31. 5. 2007, junij, stran 142.

### Novice

INTERCES, Prvo evropsko srečanje študentov gradbeništva, januar, stran 27.

### Naslovnice

Bergant, M., Sanacija stebrov AB okvirjev v Luki Koper, julij.

Brueckner, W., Gradnja Puhovega mostu preko Drave na Ptuj, februar.

Duhovnik, J., Stari in novi viadukt Peračica na gorenjski avtocesti, september.

Duhovnik, J., Termalni center Laško, avgust.

Duhovnik, J., Viadukt Dobruša na gorenjski avtocesti, december.

Krivec, A., Montažno krožno križišče v Slovenj Gradcu, november.

Lutar, B., 3D model avtocestnega nadvoza 4-5 na AC Karavanke-Obrežje, odsek Šentvid-Koseze, januar.

Lutar, B., Viadukt Vranke in deli njegovega modela, april.

Markelj, V., Puhov most čez Dravo na Ptuj, junij.

Mikoš, M., Porušen most na cesti v Davčo, oktober.

Može, P., Preskus jeklenega spoja z enim vijakom v laboratoriju FGG, maj.

Ponting Maribor, 3D prikaz novega mostu v Beogradu, marec.

**PRIPRAVLJALNI SEMINARJI IN IZPITNI ROKI ZA STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2008**

| SEMINAR  |                   | IZPIT               |             |
|----------|-------------------|---------------------|-------------|
|          |                   | Osnovni, dopolnilni | Revidiranje |
| Februar  | 11. – 13. (3 dni) |                     |             |
| Marec    |                   | 18.                 | 25.         |
| April    | 14. – 16. (3 dni) |                     |             |
| Maj      |                   | 27.                 |             |
| Oktober  | 6. – 8. (3 dni)   |                     | 21.         |
| November |                   | 11.                 |             |

**A. PRIPRAVLJALNI SEMINARJI:**

Pripravljalne seminarje organizira **Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Leskoškova 9E, 1000 Ljubljana;**

Telefon: (01) 52-40-200; Fax: (01) 52-40-199; e-naslov: [gradb.zveza@siol.net](mailto:gradb.zveza@siol.net)

Seminar vključuje **izpitne programe** za:

1. odgovorno projektiranje (osnovni in dopolnilni strokovni izpit)
2. odgovorno vodenje del (osnovni in dopolnilni strokovni izpit)
3. odgovorno vodenje posameznih del
4. Investicijski procesi in vodenje projektov – predavanje za kandidate, ki morajo opraviti dopolnilni strokovni izpit s tega področja. Predavanje se izvaja v okviru rednih seminarjev.

(Vsi posamezni programi so dostopni na spletni strani IZS - MSG:  
<http://www.izs.si>, v rubriki »Strokovni izpiti«)

**Cena** za udeležbo na **seminarju** po izpitnih programih 1., 2. in 3. točke znaša 613,00 EUR z DDV, za predavanje in literaturo pod 4. točko pa 87,63 EUR z DDV.

Kotizacijo za seminar je potrebno **nakazati ob prijavi** na poslovni račun:  
**SI56 0201 7001 5398 955**, kopijo dokazila o plačilu pa priložiti k prijavi!

Udeleženca prijavi k seminarju plačnik (podjetje, družba, ustanova, sam udeleženec...). **Prijavo v obliki dopisa** je potrebno poslati organizatorju (ZDGITS) najkasneje **15 dni pred pričetkom** seminarja (z obvezno priložo dokazila o plačani kotizaciji)!

**Prijava mora vsebovati:** priimek, ime, poklic (zadnja pridobljena izobrazba), izpitni program (1./2./3./4. – Glej zgoraj!), naslov udeleženca ter natančni naslov in ID DDV številko plačnika.

Seminar ni obvezen, zato je izvedba seminarja odvisna od števila prijav (najmanj 20).

**B. STROKOVNI IZPITI**

potekajo pri **Inženirski zbornici Slovenije (IZS), Jarška 10-B, 1000 Ljubljana**. Informacije je mogoče dobiti na spletni strani IZS <http://www.izs.si> (kjer se nahajajo vse informacije o strokovnih izpitih in izpitni programi) in po telefonu (01) 547-33-15 ob uradnih urah (ponedeljek, sreda, četrtek, petek: od 8.00 do 12.00 ure; v torek od 12.00 do 16.00 ure)

# KOLENDAR PRIREDITEV

**13.-15.2.2008**

**IT-Trans 2008 - International Conference and showcase  
Karlsruher Messe und Kongress**

Karlsruhe, Nemčija  
maristella.angotzi@uitp.org  
www.it-trans.org

**9.-12.3.2008**

**GEOCongress 2008  
The Challenge of Sustainability in the Geoenvironment Annual  
Congress of the Geo-Institute of ASCE**

New Orleans, Louisiana, ZDA  
www.adsc-iafd.com/files/public/GeoCongress2008.pdf

**21.-25.4.2008**

**TRA 2008  
2nd Transport Research Arena (TRA)**

Ljubljana, Slovenija  
www.traconference.com

**24.-26.4.2008**

**Structures 2008 Congress**

Vancouver, Kanada  
[http://content.asce.org/conferences/structures2008/  
index.html](http://content.asce.org/conferences/structures2008/index.html)

**18.-21.5.2008**

**EM08  
The Inaugural International Conference of the  
Engineering Mechanics Institute**

Minneapolis, Minnesota, ZDA  
www.cce.umn.edu/conferences/em08

**19.-22.5.2008**

**Internationales fib-Symposium 2008**

Amsterdam, Nizozemska  
dick@betonvereniging.nl  
www.fib2008amsterdam.nl

**4.-6.6.2008**

**IABSE Conference  
ICT for Bridges, Buildings and Construction Practice**

Helsinki, Finska  
www.iabse.org

**30.6.-4.7.2008**

**10th International Symposium on  
Landslides and Engineered Slopes**

Xi'an, Kitajska  
www.landslide.iwhr.com

**8.-10.7.2008**

**7th International Congress Concrete:  
Construction's Sustainable Option**

Dundee, Škotska  
www.ctucongress.co.uk

**3.-5.9.2008**

**EUROSTEEL 2008**

Gradec, Avstrija  
www.eurosteel2008@tugraz.at

**17.-19.9.2008**

**7th RILEM International Symposium on  
Fibre Reinforced Concrete (BEFIB 2008)**

Chennai (Madras), Indija  
www.befib2008.iitm.ac.in

**24.-26.11.2008**

**2nd International Conference on Concrete Repair,  
Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR 2008)**

Cape Town, Južna Afrika  
www.civil.uct.ac.za/iccrrr

**5.-9.10.2009**

**17th International Conference for Soil  
Mechanics and Geotechnical Engineering**

Alexandria, Egipt  
www.2009icsmge-egypt.org

Rubriko ureja • **Jan Kristijan Juteršek**, ki sprejema predloge  
za objavo na e-naslov: [mvg@izs.si](mailto:mvg@izs.si)