

TEMPERATURNANALIZA POSTOPNE GRADNJE MASIVNIH BETONSKIH KONSTRUKCIJ

THERMAL ANALYSIS OF SUCCESSIVE CONSTRUCTION OF MASS CONCRETE STRUCTURES

Anka Ilc, univ. dipl. inž. grad.

Primorje, d. d., Vipavska cesta 3, 5270 Ajdovščina

Gregor Trtnik, univ. dipl. inž. grad.

IGMAT, d. d., Polje 351 c, 1000 Ljubljana

izr. prof. dr. Igor Planinc, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana

prof. dr. Goran Turk, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK: 624.012.4

Povzetek | V članku je prikazan nov numerični postopek za določanje temperatur strjujočega se betona pri masivnih betonskih konstrukcijah. Model je zasnovan na osnovi metode končnih elementov in omogoča relativno preprosto modeliranje postopne gradnje. Dobro ujemanje med numeričnimi in eksperimentalnimi rezultati temperatur strjujočega se betona pri masivnem armiranobetonskem vodnjaku dokazuje veliko natančnost in s tem primernost predstavljenega numeričnega postopka za analizo postopne gradnje vseh vrst masivnih betonskih konstrukcij.

Summary | A new numerical procedure for the prediction of temperature development in early age mass concrete structures is briefly presented. This model is implemented in the finite element code and enables modelling of successive construction. In order to analyze the adequacy of the model, temperature profile was both measured on site and calculated with the proposed numerical model. Calculated results are in good agreement with the experimentally determined temperature profile. Therefore, the presented numerical procedure can be effectively used to model the temperature development in mass concrete structures.

1 • UVOD

Sproščanje hidratacijske toplote med strjevanjem betona pri gradnji večine gradbenih konstrukcij ne povzroča večjih težav, nasprotno pa lahko pri masivnih betonskih konstrukcijah zaradi oteženega odvajanja sproščene hidratacijske toplote povzroča pregrevanje

betona in posledično nezaželene poškodbe. Tehnološki postopki gradnje masivnih betonskih konstrukcij zato pogosto zahtevajo postopno gradnjo z manjšimi betonskimi bloki oziroma sloji, kar tovrstne poškodbe prepreči.

Zaradi pomembnosti masivnih betonskih konstrukcij v gradbeništvu zasledimo v literaturi številne raziskave, ki se ukvarjajo s temperaturno analizo tovrstnih konstrukcij in s tem povezanimi pojavi. Raziskave lahko razdelimo v dve glavni skupini. V prvo uvrščamo raziskave o kemijskih in fizikalnih lastnostih betona med strjevanjem ((Hakarai, 2007), (Ishida, 2007), (Scherer, 2007), (Snelson, 2008)), drugo skupino pa predstavljajo numerični

postopki za temperaturno analizo betona med strjevanjem oziroma med gradnjo. Z razvojem računalništva dobivajo te raziskave vse večji pomen. Glede na uporabljeno numerično metodo za reševanje osnovne enačbe prevajanja toplote v trdni snovi ločimo numerične metode, zasnovane na diferencialni metodi ((Turk, 1991), (Ballim, 2004)) oziroma na metodi končnih elementov ((Turk, 1991), (Tanabe, 1985), (Hue, 2000), (Faria, 2006)). Glavna pomanjkljivost teh raziskav je v tem, da razviti numerični postopki ne omogočajo določitve temperatur strjujočega se betona pri postopni

gradnji masivnih betonskih konstrukcij, kar je ena od pomembnih značilnosti gradnje tovrstnih konstrukcij.

V članku prikazujemo nov numerični postopek za določitev temperatur strjujočega se betona pri postopni gradnji masivnih betonskih konstrukcij. Novost prikazanega postopka, ki je zasnovan na metodi končnih elementov, je v postopnem vključevanju novih končnih elementov v globalno mrežo. S primerjavo med numeričnimi in eksperimentalnimi rezultati temperatur strjujočega se betona pri postopni gradnji masivnega

armiranobetonskega vodnjaka smo analizirali natančnost in s tem ustreznost predstavljenega numeričnega postopka za analizo postopne gradnje masivnih betonskih konstrukcij. Dodatno smo s tem postopkom določili optimalni režim gradnje armiranobetonskega masivnega vodnjaka. Optimalne debeline betonskih slojev vodnjaka in časovni presledek med betoniranjem le-teh smo določili z upoštevanjem zahtevanih temperaturnih omejitev skladno s prEN 13670:2007 oziroma drugimi dostopnimi eksperimentalnimi rezultati.

2 • TEORETIČNE OSNOVE

Časovno spreminjanje temperatur v strjujočem se betonu pri postopni gradnji masivne betonske konstrukcije določimo z rešitvijo znane Fourierove parcialne diferencialne enačbe prevajanja toplote v trdni snovi:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q. \quad (1)$$

Enačbo (1) rešimo z upoštevanjem naslednjih robnih in začetnih pogojev:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z + h(T - T_A) + \sigma e(T^4 - T_R^4) = 0, \quad (2)$$

$$T(x, y, z, t) = T_B(t), \quad (3)$$

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z), \quad (4)$$

kjer sta ρ in c_p gostota in specifična toplota betona, k_x , k_y in k_z pa so toplotne prevodnosti betona v smereh x , y in z . V enačbah (1–4) je $T = T(x, y, z, t)$ temperatura betona pri času t , Q pa je sproščena hidratacijska toplota betona, ki jo določimo na osnovi adiabatskega preizkusa. V enačbi (2) so n_x , n_y in n_z označene komponente vektorja normale na robno ploskev, T_A je temperatura okolice, h prestopni koeficient zraka, T_R temperatura

sevajočih teles v okolici obravnavane konstrukcije, σ Stefan – Boltzmanova konstanta, in e emisivnost sevajoče površine. T_B v enačbi (3) je predpisana temperatura na površini betonskega elementa, T_0 v enačbi (4) pa je začetna temperatura betona.

Skladno z metodo končnih elementov lahko enačbo (1) zapišemo v diskretizirani obliki (Cook, 1989):

$$\mathbf{Kt} + \mathbf{Ct}_t = \mathbf{f}, \quad (5)$$

kjer so \mathbf{K} , \mathbf{C} in \mathbf{f} globalna prevodnostna matrika, globalna kapacitetna matrika in globalni vektor desnih strani, \mathbf{t} je vektor vozliščnih temperatur, \mathbf{t}_t pa vektor časovnih odvodov vozliščnih temperatur.

Sproščeno toploto $Q_a(t)$ v adiabatskih razmerah določimo na osnovi adiabatske krivulje $T_a(t)$ z enačbo:

$$Q_a(t) = T_a(t) \rho c_p. \quad (6)$$

V literaturi zasledimo različne enačbe za določitev adiabatske krivulje ((Morabito, 2001), (Ammar, 1973), (Van Breugel, 1997)). V prikazanem numeričnem postopku za analizo postopne gradnje masivnih betonskih konstrukcij izberemo za adiabatsko krivuljo krivuljo sigmoidne oblike (Ammar, 1973):

$$T_a(t) = a + b \cdot e^{-(c/t)^d}, \quad (7)$$

kjer so a , b , c in d materialni parametri. Določimo jih z metodo najmanjših kvadratov za vsako betonsko mešanico posebej.

Ker v naravnem okolju adiabatskih pogojev običajno ni, moramo količino sproščene hidratacijske toplote betona ustrezno popraviti. S tem namenom vpeljemo zrelostno funkcijo f_A , s katero v analizi upoštevamo vpliv temperature in časa na sproščanje hidratacijske toplote. V svojem modelu smo uporabili Arrheniusovo zrelostno funkcijo, ki jo določa enačba:

$$f_A(T, Q_a) = \exp \left(-\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{\left(\frac{Q_a}{\rho c_p} \right) + T_0^a} \right) \right). \quad (8)$$

V enačbi (8) R predstavlja plinsko konstanto ($R = 8,315 \text{ J/mol K}$), E_A je aktivacijska energija, T_0^a pa začetna temperatura betona pri adiabatskem preizkusu. Količino sproščene hidratacijske toplote v betonski konstrukciji lahko tako izrazimo z enačbo:

$$Q = f_A Q_a. \quad (9)$$

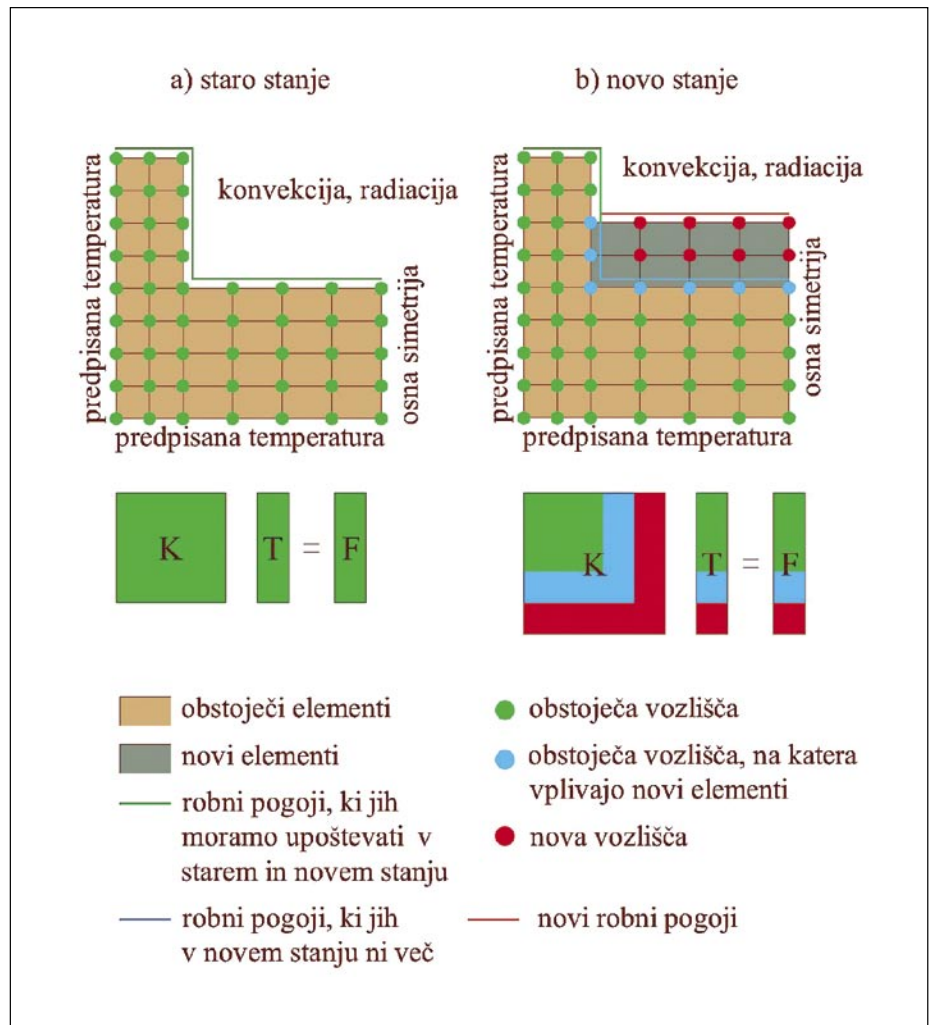
Temperatura strjujočega se betona pri masivnih betonskih konstrukcijah je v veliki meri odvisna od postopne gradnje masivnih blokov. Zato smo razvili numerični model s pripadajočim računalniškim programom, s katerim s podajanjem začetnega in končnega časa aktivnosti posameznega končnega elementa in ustreznih robnih pogojev relativno preprosto modeliramo postopno gradnjo. Bistveni operaciji, ki jih mora računalniški program izvajati za modeliranje postopne gradnje, sta dodajanje in odzemanje končnih elementov, vozlišč in robnih pogojev v globalni mreži končnih elementov.

Ko se v nekem časovnem koraku zaradi postopne gradnje pojavi nov končni element, ga mora program dodati v globalno mrežo končnih elementov, kar shematsko prikazujemo na sliki 1. Tedaj program preveri, če novi element vključuje nova vozlišča. Če jih vključuje, se začetne temperature teh vozlišč dodajo v globalni sistem enačb kot nove prostostne stopnje. Novi končni element s podano začetno temperaturo vozlišč ne vpliva samo na nova vozlišča, ampak tudi na že obstoječa. V vozliščih, kjer je novi končni element v stiku z že obstoječimi, se temperatura izračuna kot obteženo povprečje, kjer je utež toplotna vdornost snovi b (Kladnik, 1983). V pravokotni mreži dvodimenzionalnih končnih elementov se lahko stikajo največ štiri elementi. Temperaturo skupnega vozlišča T v tem primeru izračunamo z enačbo:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{n_v} b_i T_i}{\sum_{i=1}^{n_v} b_i}, \quad b_i = \sqrt{\lambda_i \rho_i c_{pi}}, \quad (10)$$

kjer je T_i temperatura obravnavanega vozlišča i -tega končnega elementa, b_i , λ_i , ρ_i in c_{pi} pa so toplotna vdornost, toplotna prevodnost, gostota in specifična toplota i -tega elementa ($i = 1 \dots n_v$). Z n_v smo označili število elementov, ki imajo skupno obravnavano vozlišče. V večini primerov je n_v enako 4, lahko pa je tudi 2 ali 3.

Na sliki 1 so z zeleno barvo označena vozlišča, ki so aktivna ves čas analize, z rdečo pa tista, ki so postala aktivna po vključitvi novih elementov. Z modro barvo so označena vozlišča, ki so bila pred dodajanjem novih elementov na robu, ob vključitvi novih elementov pa moramo njihovo temperaturo določiti po enačbi (10). Ob vključitvi novih končnih elementov postanejo nekateri zunanji robovi meje med



Slika 1 • Shematski prikaz dodajanja novih končnih elementov v globalno mrežo končnih elementov

elementi (modra črta), zato tam robnih pogojev ne moremo predpisati, nove robne pogoje pa dobimo na zunanjih robovih novih elementov (rdeča črta).

Pomembna prednost prikazanega postopka za modeliranje postopne gradnje je tudi v

tem, da poleg dodajanja novih končnih elementov v globalno mrežo omogoča tudi njihovo odstranjevanje. To bi na primer lahko uporabili za modeliranje toplotne izolacije ali pa opaža, ki ga seveda po nekem času odstranimo.

3 • PRIMERJAVA MED EKSPERIMENTALNIMI IN NUMERIČNIMI REZULTATI

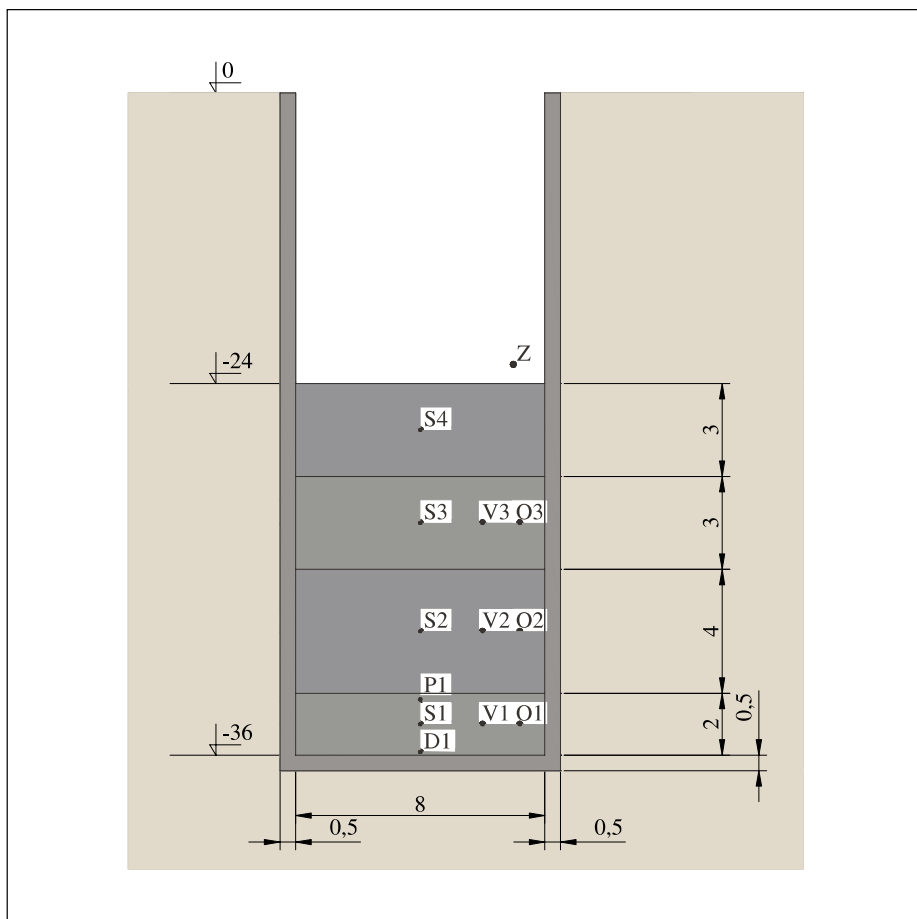
3.1 Meritve

Pri gradnji odseka hitre ceste Vipava–Razdrto preko pobočja Rebernice so bili kot temelji hitre ceste pri premoščanju plazovitega območja zgrajeni trije masivni armiranobetonski vodnjaki. Vodnjake s premerom 8 m in globino približno 40 m s približno pol metra debelim armiranobetonskim opažem (slika 2) so gradili po slojih.

Za zagotavljanje ustrezne kvalitete vgrajenega betona je bilo potrebno med gradnjo skladno s tehnološkim elaboratom določiti najvišje temperature strjujočega se betonu. Tako se je med gradnjo vodnjakov z ustrezno eksperimentalno opremo in računalniško podporo merilo časovni potek temperatur strjujočega se betona v spodnjih štirih slojih enega izmed vodnjakov. Debeline betonskih slojev in razporeditev merskih

točk prikazujemo na sliki 2. Poleg merjenja temperatur betona v 12 točkah je bila merjena tudi temperatura zraka, vedno pol metra nad trenutno najvišjim slojem.

Betoniranje prvih štirih slojev je potekalo 23. 6., 3. 7., 15. 7. in 22. 7. 2008, temperature pa so bile z nekaj prekinitvami merjene med 23. 6. in 25. 7. 2008, torej v poletnem času. Zaradi omejenega števila merilnih kanalov uporabljenega merilnega inštrumenta se je merjenje v nekaterih merskih točkah spodnjih slojev opuščalo, kar je omogočilo meritve temperatur v zgornjih slojih.



Slika 2 • Geometrijski podatki masivnega armiranobetonskega vodnjaka ter lege merskih točk z ustreznimi oznakami

Rezultate meritev prikazujemo na slikah 4 do 6. Na slikah vidimo, da je bila najvišja temperatura skladno s pričakovanji izmerjena v drugem, najdebelejšem sloju, pričakovano pa so bile izmerjene temperature v prvem, najtanjšem sloju najnižje. Hkrati pa te slike kažejo tudi vpliv postopne gradnje na časovno razporeditev temperatur betonskih slojev. Vidimo, da se po vgradnji drugega (najdebelejšega) sloja temperatura v prvem sloju zopet poveča, medtem ko vgradnja naslednjih 3 m debelih slojev nima bistvenega vpliva na razporeditev temperatur predhodnih slojev.

3.2 Numerični postopek in določitev materialnih parametrov

Kot smo že povedali, določimo temperaturo v strujočem se betonu pri masivnih beton- skih konstrukcijah z metodo končnih elemen-

tov. Glede na obliko vodnjakov smo v analizi uporabili osnosimetrične izoparametrične končne elemente z dvotočkovno Gaussovo ploskovno integracijsko shemo. Temperature v vozliščih končnih elementov smo zaradi relativno dolgega obdobja merjenja računali na vsako uro. Za časovno integracijo smo izbrali znano Galerkinovo metodo, znotraj vsakega časovnega koraka pa smo reševali diskretizirane enačbe prevajanja toplote iterativno z natančnostjo 10^{-6} °C.

Začetna temperatura betona je nihala med 21 °C (prvi in četrti sloj) in 26 °C (drugi sloj). Poleg samega vodnjaka je bilo v numerični model vključeno še 3 m široko območje tal v okolici, ki ima na robu predpostavljeno konstantno temperaturo 12 °C, kar približno ustreza temperaturi tal na globini, do katere

ne seže letno nihanje temperature. Na delih betonskih slojev, ki so bili izpostavljeni zraku, je bil prehod toplote modeliran s konvekcijo in radiacijo. Temperatura zraka je bila z manjšimi odstopanji približno 15 °C. Za prestopni koeficient zraka smo izbrali vrednost $100.000 \text{ J/h m}^2 \text{ °C}$, kar ustreza relativno mirnemu ozračju na dnu vodnjaka, za emisivnost betona pa vrednost 0,94.

Ker ostali, za numerični postopek potrebni materialni parametri niso bili izmerjeni, smo v analizi za te predpostavili značilne vrednosti, ki se v analizah običajno uporabljajo. Prikazujemo jih v preglednici 1. Zaradi precej mokrih tal v okolici vodnjaka smo za zemljino predpostavili nekoliko višjo vrednost specifične toplote.

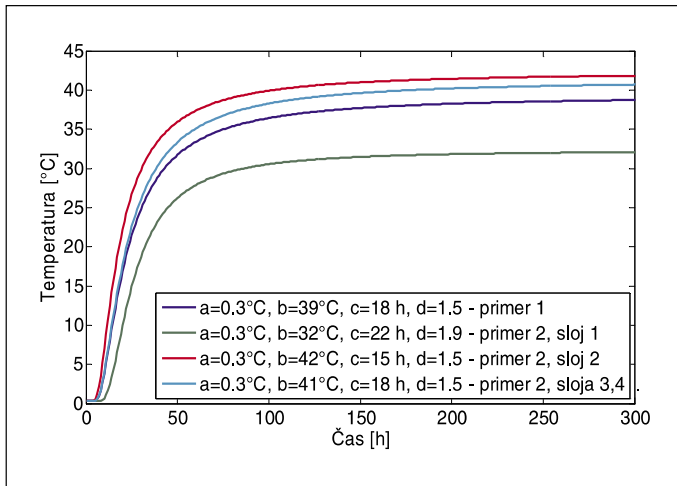
Ker adiabatni preizkusi vgrajenih betonov vodnjaka niso bili narejeni, smo vrednosti parametrov adiabatne krivulje in aktivacijske energije smiselno predpostavili oziroma ocenili na podlagi izmerjenih temperatur v notranjosti betonskih slojev. Za vrednost aktivacijske energije smo izbrali 44500 J/mol (Schindler, 2002). Ker so meritve pokazale, da so izmerjene temperature betonskih slojev različne, smo masivni armiranobetonski vodnjak analizirali na dva načina: pri prvem smo predpostavili enako adiabatno krivuljo za vse sloje, pri drugem pa različne. Te smo določili tako, da se kar najbolje prilagodijo meritvam temperatur v sredini ustreznih betonskih slojev. Pri analizi masivnega armiranobetonskega vodnjaka z enako adiabatno krivuljo v vseh slojih smo adiabatno krivuljo določili s povprečjem adiabatnih krivulj posameznih slojev. Vse uporabljene adiabatne krivulje prikazujemo na sliki 3.

3.3 Primerjava med eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati

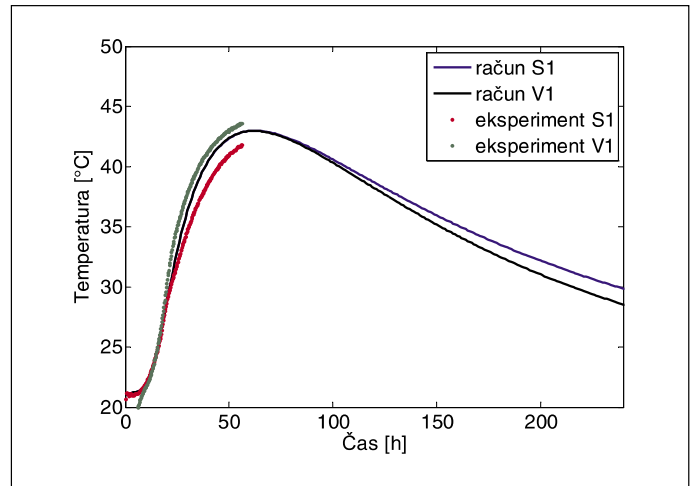
V prvem in tretjem sloju obravnavanega masivnega armiranobetonskega vodnjaka so izmerjene temperature v vmesnih merskih točkah (V) za 2 do 3 °C višje od izmerjenih temperatur v središčnih merskih točkah (S) (slika 4). To je seveda nepričakovano, saj v vsakem sloju merski točki z oznakama V in S ležita na isti višini, pri čemer je točka S v središču sloja, točka V pa na razdalji 2 m od središča (slika 2). Ker se tudi izračunane temperature v obeh merskih točkah na časovnem intervalu od začetka gradnje pa do nastopa najvišje temperature praktično ne razlikujejo (slika 4), lahko sklepamo, da je razlika izmerjenih temperatur v merskih točkah S in V najverjetneje posledica nehomogenosti vgrajenega betona oziroma napak meritev. Zato v

Material	$k \text{ (J/m h °C)}$	$c \text{ (J/kg °C)}$	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Beton	9000	1000	2400
Zemljina	5000	1500	1460

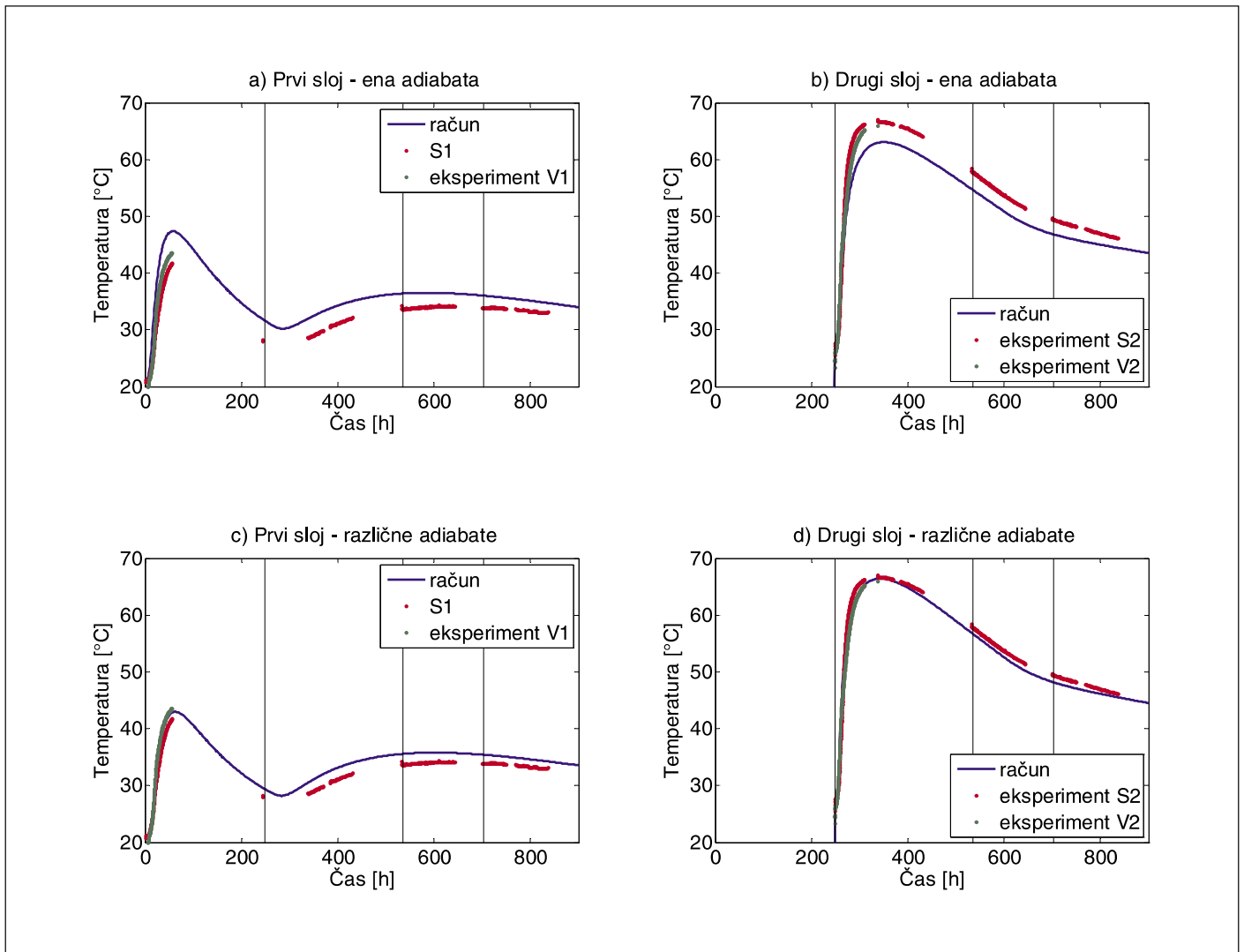
Preglednica 1 • Izbrani materialni parametri betona in zemljine



Slika 3 • Uporabljene adiabatne krivulje



Slika 4 • Primerjava med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami v merskih točkah S1 in V1 ob upoštevanju različnih adiabatnih krivulj posameznih slojev



Slika 5 • Primerjava med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami v središčnih merskih točkah betonskih slojev za račun z upoštevanjem enakih oziroma različnih adiabatnih krivulj v posameznih slojih

nadaljevanju izmerjene temperature v merskih točkah S in V primerjamo le z izračunanimi temperaturami v točki S.

Na sliki 5 prikazujemo primerjavo med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami v središčnih merskih točkah v prvem in drugem sloju. Vidimo, da z uporabo enake adiabatne krivulje za vse sloje masivnega armiranobetonskega vodnjaka izračunamo v prvem sloju za okoli 3 °C previsoke temperature, v zadnjih treh slojih pa za okoli 3 °C prenizke (sliki 5a in 5b). Ker vgrajeni betoni verjetno niso imeli povsem enakih lastnosti v vseh slojih, smo v nadaljevanju analizo ponovili še z uporabo različnih adiabatnih krivulj za posamezne sloje. Rezultate te analize prikazujemo na

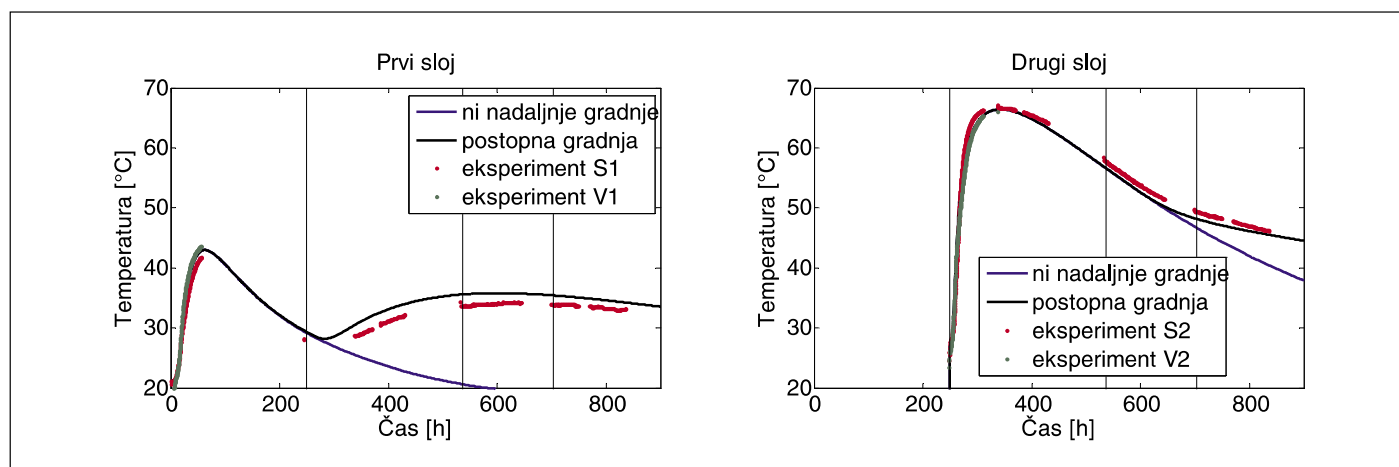
slikah 5c in 5d. Po pričakovanjih smo sedaj dobili boljše ujemanje med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami. Boljše ujemanje temperatur pa opazimo tudi v ostalih merskih mestih betonskega sloja.

3.4 Vpliv postopne gradnje na časovno razporeditev temperatur v betonskih slojih

Zaradi sproščanja hidratacijske toplote v betonu višje ležečega sloja se spremeni tudi temperatura spodnjega sloja (slika 5). Na sliki 5 vidimo, da se po betoniranju drugega sloja temperatura v prvem sloju ponovno poveša. Sproščena hidratacijska toplota v drugem sloju namreč s prevajanjem toplote segreje prvi (spodnji) sloj, hkrati pa dovedena hid-

ratacijska toplota pospeši proces hidratacije cementa v zgornji polovici prvega sloja. Na enak način tudi drugi, višje ležeči sloji vplivajo na nižje ležeče sloje. Ker so v obravnavanem masivnem armiranobetonskem vodnjaku ti sloji debelejši, ta vpliv ni tako izrazit.

Na sliki 6 prikazujemo primerjavo med izračunanimi in izmerjenimi temperaturami betonskih slojev pri postopni gradnji. Na sliki opazimo odlično ujemanje rezultatov, kar potrjuje primernost predstavljenega numeričnega postopka za analizo postopne gradnje masivnih betonskih konstrukcij. Za primerjavo prikazujemo na sliki 6 tudi temperaturo v betonskih slojih v primeru, če postopne gradnje vodnjaka v analizi ne bi upoštevali.



Slika 6 • Primerjava med izračunanimi in izmerjenimi temperaturami pri postopni gradnji in v primeru, če postopne gradnje v analizi ne bi upoštevali. (a) Primerjava rezultatov v prvem in (b) v drugem sloju vodnjaka.

4 • IZBIRA USTREZNIH DEBELIN SLOJEV IN ČASOVNEGA PRESLEDKA MED BETONIRANJI

4.1 Zahteve glede dovoljenih najvišjih temperatur in temperaturnih gradientov

Eksperimentalno je dokazano, da se pri temperaturah betona nad 70 °C zmanjša tlačna trdnost betona in poveča njegova poroznost (glej prEN 13670:2007). Tako v članku optimalno razmerje med debelinami betonskih slojev obravnavanega masivnega armiranobetonskega vodnjaka in časovnimi presledki med betoniranjem le-teh (v nadaljevanju optimalni režim gradnje) določimo glede na dovoljeno najvišjo temperaturo v betonu, ki znaša 70 °C. Ker poleg previsokih temperatur poškodbe betona povzročajo tudi previsoki temperaturni gradienti, določimo optimalni režim gradnje vodnjaka tudi glede na dovoljeni najvišji temperaturni gradient, ki je skladno z eksperimentalnimi podatki 25 °C/50 cm.

4.2 Vpliv debeline betonskih slojev in časovnih presledkov med betoniranjem le-teh na temperaturo betonskih slojev

Na optimalni režim gradnje poleg tehnoloških zahtev bistveno vplivajo tako same debeline betonskih slojev kot tudi časovni presledek med betoniranjem le-teh in s tem povezana temperatura betonskih slojev. Ta vpliv določimo s predstavljenim numeričnim postopkom postopne gradnje. Rezultate analize prikazujemo v preglednici 2, in sicer za debeline slojev od enega do štirih metrov ter za enodnevne, dvodnevne, štiridnevne in sedemdnevne časovne presledke med betoniranjem slojev. Vse prikazane rezultate smo izračunali z uporabo povprečne adiabatne krivulje (primer 1 na sliki 3), začetno temperaturo betona 25 °C in s temperaturo zraka 15 °C.

V preglednici 2 vidimo, da najvišja temperatura v nobenem primeru ne preseže najvišje dovoljene temperature 70 °C. Ta ni bila vedno v središču betonskega sloja, pri hitri postopni gradnji je bila lahko tudi nižje. Pri daljših časovnih presledkih med gradnjo slojev je bila najvišja temperatura dosežena kmalu po vgradnji betona, pri krajših časovnih presledkih pa po vgradnji naslednjega ali pa katerega od nadaljnjih slojev.

Kot vidimo v preglednici 2, so bili v vseh primerih kritičnejši temperaturni gradienti. Skladno s pričakovanji so se najvišji temperaturni gradienti pojavili na površini betonskega sloja na stiku z zrakom približno 36 ur po vgradnji betona. V bližini stika z zemlino so bili temperaturni gradienti manjši in nikjer niso presegli 20 °C/50 cm. Tako lahko sklepamo, da bi v tem letnem času lahko gradili večje betonske bloke in s tem bistveno povečali hitrost gradnje masivnih betonskih konstrukcij, če bi zgornjo površino betonskega sloja vsakič za nekaj dni po betoniranju toplotno izolirali.

Časovni presledki (dan)	7	4	2	1
Debelina plasti 4 m				
Najvišja temperatura (°C)	61,34	61,42	61,85	62,43
Najvišji temperaturni gradient (°C/50 cm)	25,3	25,3	25,3	25,3
Debelina plasti 3 m				
Najvišja temperatura (°C)	59,0	59,3	60,2	61,5
Najvišji temperaturni gradient (°C/50 cm)	25,3	25,3	25,3	25,3
Debelina plasti 2 m				
Najvišja temperatura (°C)	54,4	55,4	56,9	60,4
Najvišji temperaturni gradient (°C/50 cm)	25,00	25,05	25,07	25,11
Debelina plasti 1 m				
Najvišja temperatura (°C)	42,0	44,1	47,9	57,4
Najvišji temperaturni gradient (°C/50 cm)	20,5	22,2	24,0	25,3

Preglednica 2 • Najvišje temperature in najvišji temperaturni gradient betonskega sloja v odvisnosti od debeline sloja in časovnih presledkov med betoniranjem slojev

Debelina sloja (m)	Časovni presledek (dan)	Število slojev	Čas gradnje* (dan)	Najvišja temperatura (°C)	Najvišji temperaturni gradient (°C/50 cm)
2,0	7	20	134	54,4	25,0
1,5	3	27	79	52,3	24,9
1,0	2	40	79	50,2	24,0

* Kot konec gradnje vodnjaka izberemo pričetek betoniranja zadnjega sloja.

Preglednica 3 • Optimalni režim gradnje masivnega armiranobetonskega vodnjaka

Iz preglednice 2 lahko tudi ugotovimo, da je vpliv sosednjih slojev na debelejšje sloje minimalen, saj je najvišja temperatura v štiri metre debelem sloju praktično enaka, ne glede na to, ali novi sloj zabetoniramo po enem tednu ali enem dnevu. Pri debelejših slojih razmerje

med površino plašča in površino osnovnih ploskev masivnega sloja (valja) narašča, zato se betonski valj bolj hladi skozi plašč, posledično pa ima postopna gradnja na razporeditev temperatur manjši vpliv. Hkrati pa se v debelejših betonskih slojih v notra-

		Najvišja temperatura (°C)	Najvišji temperaturni gradient (°C/50 cm)
Začetna temperatura betona (°C)	20	48,1	21,1
	25	52,3	24,9
	30	57,4	29,2
	35	62,9	34,1
Temperatura zraka (°C)	10	50,9	27,2
	15	52,3	24,9
	20	53,1	22,6
Prestopni koeficient zraka (J/(m ² °Ch))	50000	53,1	23,1
	100000	52,3	24,9
	200000	51,6	26,2

Preglednica 4 • Parametrična študija vpliva značilnih parametrov na najvišjo temperaturo in najvišji temperaturni gradient pri postopni gradnji masivnega armiranobetonskega vodnjaka

njosti vzpostavijo skoraj adiabatske razmere in višje temperature, kot jih določajo adiabatske krivulje, niso možne.

4.3 Optimalni režim gradnje masivnega armiranobetonskega vodnjaka

V tem poglavju določimo optimalni režim gradnje obravnavanega masivnega armiranobetonskega vodnjaka. Tega določimo s hkratnim spreminjanjem debeline betonskih slojev in časovnih presledkov med betoniranjem teh slojev ob upoštevanju najvišje dovoljene temperature in najvišjega dovoljenega temperaturnega gradienta. Opozorimo pa, da na optimalni režim gradnje vodnjakov vplivajo tudi druge tehnološke zahteve, ki jih v članku ne upoštevamo. Glede na rezultate analiz v prejšnjem poglavju ugotovimo, da je v obravnavanem masivnem armiranobetonskem vodnjaku dovoljena postopna gradnja z največ 2 m debelimi sloji. Tako v nadaljevanju optimizacije režima gradnje vodnjaka v preglednici 3 prikazujemo optimalne časovne presledke betoniranja betonskih slojev vodnjaka le za 2 m, 1,5 m in 1 m debele sloje. Rezultati v preglednici 3 kažejo, da je optimalni (najkrajši) čas gradnje obravnavanega masivnega armiranobetonskega vodnjaka 79 dni. Tega dosežemo s postopnim betoniranjem tako 1,5 m kot 1 m debelih betonskih slojev. Pri postopni gradnji z 1,5 m debelimi sloji je časovni presledek med betoniranjem 3 dni, pri 1 m debelih slojih pa 2 dneva.

4.4 Vpliv značilnih parametrov na temperaturo betonskega sloja

V tem poglavju analiziramo vpliv začetne temperature betona, temperature zraka in prestopnega koeficienta zraka na časovno in krajevno razporeditev temperatur v masivnih betonskih konstrukcijah, saj se običajno vrednosti teh parametrov v naravi bistveno razlikujejo od projektnih. Parametrično študijo prikazujemo za primer gradnje masivnega armiranobetonskega vodnjaka z 1,5 m debelimi sloji in tridnevni časovni presledki med betoniranjem le-teh (preglednica 4).

Iz rezultatov v preglednici 4 vidimo, da začetna temperatura betona pomembno vpliva na najvišjo temperaturo in najvišji temperaturni gradient v masivnem armiranobetonskem vodnjaku.

Še bolj nepredvidljiva od začetne temperature betona sta temperatura zraka in njegov prestopni koeficient. Tako je temperatura zraka na dnu vodnjaka skoraj konstantna, medtem ko je pri vrhu vodnjaka, kjer se že čuti vpliv vremenskih sprememb, precej spremenljiva. Podobno velja tudi za prestopni koeficient zra-

ka. Iz rezultatov v preglednici 4 lahko vidimo, da temperatura zraka in prestopni koeficient zraka sicer ne vplivata bistveno na najvišjo

temperaturo betona, imata pa velik vpliv na najvišji temperaturni gradient ob zgornji izpostavljeni površini betonskega sloja. Višja

temperatura zraka in nižji prestopni koeficient vplivata ugodno, nižja temperatura in višji prestopni koeficient pa neugodno.

le-teh ob pogojih, da najvišje temperature betona niso višje od dovoljenih skladno s prEN 13670:2007 ter da istočasno najvišji temperaturni gradienti niso višji od 25 °C/50 cm. S parametričnimi študijami smo ugotovili, da je za 40 m globok vodnjak s premerom 8 m najkrajši čas gradnje 79 dni. Teža dosežemo tako z 1,5 m debelimi betonskimi sloji in tridnevnimi časovnimi presledki med betoniranjem le-teh kot tudi z 1 m debelimi sloji in dvodnevnimi časovnimi presledki.

5 • SKLEP

V članku smo predstavili nov numerični postopek za določanje temperatur strjujočega se betona pri postopni gradnji masivnih betonskih konstrukcij. S primerjavo med eksperimentalnimi in izračunanimi temperaturami masivnega armiranobetonskega vodnjaka smo ugotovili, da je predstavljen numerični postopek zelo natančen in kot tak primeren za

analizo postopne gradnje vseh vrst masivnih betonskih konstrukcij.

V nadaljevanju smo s predstavljenim numeričnim postopkom določili optimalni režim gradnje masivnega armiranobetonskega vodnjaka. Teža smo določili s hkratnim spreminjanjem debeline slojev vodnjaka in časovnega presledka med betoniranjem

6 • ZAHVALA

Raziskavo sta financirala Evropska unija iz Evropskega socialnega sklada in Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo RS v sklopu projekta Mladi raziskovalci iz gospodarstva.

7 • LITERATURA

- Ammar, C., Duftron, P., Motteu, H., Dubois, J., La progression des betons et des mortiers par basses temperatures, C.S.T.C. – C.R.I.C. – SECO, Bruxelles, 1973.
- Ballim, Y., A numerical model and associated calorimeter for predicting temperature profiles in mass concrete, *Cement and Concrete Composites* 26, 5, 695–703, 2004.
- Cook, R. D., Malcus, D. S., Plesha, M. E., Concepts and applications of finite element analysis, John Wiley & Sons, 1989.
- Faria, R., Azenha, M., Figueiras, J. A., Modelling of concrete at early ages, Application to an externally restrained slab, *Cement and Concrete Composites* 28, 6, 572–585, 2006.
- Hakarai, K., Ishida, T., Kishi, T., Maekawa, K., Enhanced thermodynamic analysis coupled with temperature-dependent microstructures of cement hydrates, *Cement and Concrete Research* 37, 2, 139–150, 2007.
- Hue, F., Serrano, G., Bolano, J. A., Oresund Bridge. Temperature and cracking control of the deck slab concrete at early ages, *Automation in Construction* 9, 5–6, 437–445, 2000.
- Ishida, T., Maekawa, K., Kishi, T., Enhanced modelling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, *Cement and Concrete Research* 37, 4, 565–576, 2007.
- Kladnik, R., Nestacionarni temperaturni pojavi v ovojnem sklopu zgradbe, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1983.
- Morabito, P., Apparent Activation Energy, An example for determination from adiabatic hydration tests, IPACS report BE96-3043/2001, 19–2, Lulea, Sweden, 2001.
- prEN 13670:2007, Izvajanje betonskih konstrukcij, 2007–5.
- Saje, M., Turk, G., Račun temperatur v strjujočem se betonu, *Gradbeni Vestnik* 36, 7–8, 177–182, 1987.
- Scherer, G. W., Valenza J. J., Simmons, G., New methods to measure liquid permeability in porous materials, *Cement and Concrete Research* 37, 3, 386–397, 2007.
- Schindler, A. K., Dossey, T., McCullough, B. F., Temperature control during construction to improve the long term performance of portland cement concrete pavements, Texas Department of Transportation, Research project No. 0-1700-2, The University of Texas at Austin, 2002.
- Snelson, D. G., Wild, S., O'Farrell, M., Heat of hydration of Portland Cement-Metakaolin-Fly ash (PC-MK-PFA) blends, *Cement and Concrete Research* 38, 6, 832–840, 2008.
- Tanabe, T., Kawasumi, M., Yamashita, M., Thermal stress analysis of massive concrete, Proc. The Seminar for Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Tokyo, 1985.
- Turk, G., Programska oprema za račun nelinearnega in nestacionarnega prevajanja toplote z upoštevanjem raznih robnih pogojev in notranjega vira toplote zaradi hidratacije cementa. Diplomsko naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana 1987.
- Turk, G., Saje, M., Račun deformiranja masivnih betonskih konstrukcij ob upoštevanju mehanske in temperaturne obtežbe, krčenja in tečenja, Zbornik del, 29–36, Kuhljevi dnevi, Lipica, 1991.
- Van Breugel, K., Simulation of Hydration and Formation of Structure of Hardening Cement-Based Materials – HYMOSTRUC, Doktorska disertacija, Delft University of Technology, Delft, 1997.