

Masni pretoki v betonu med sušenjem

Mass Transfer in Drying Concrete

J. Šelih¹, Gradbeni inštitut ZRMK, Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1995-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1996-01-22

Članek poroča o raziskavi spreminjanja vsebnosti vode v nasičenem betonu med sušenjem s poudarkom na začetni fazi, kjer je vsebnost vode visoka, in za katero je v literaturi le malo podatkov. Eksperimentalno in numerično smo preiskali betonske cilindre iz normalnega in lahkega nosilnega betona, ki so bili izpostavljeni sušenju na zgornji površini. V lahkem betonu so prisotni višji začetni nivoji vsebnosti vode, istočasno pa so hitrosti sušenja višje kot v normalnem betonu. Visoke, konstantne vrednosti hitrosti sušenja opazimo v začetni fazi sušenja tako med eksperimentom kot z numerično simulacijo. Predstavljeni numerični model temelji na posplošeni matematični formulaciji masnega in toplotnega prenosa v poroznih materialih, njegovi rezultati za sušenje pa se ujemajo z eksperimentalnimi podatki znotraj pričakovane negotovosti vhodnih podatkov.

Ključne besede: beton, porozen material, sušenje, gravimetrična metoda, numerična simulacija, prenos mase in toplote

Moisture content changes during drying of saturated concrete are investigated experimentally and numerically in the present study. The emphasis is placed on the initial stage, where water contents are high. Cylinders made of normal and lightweight concrete were exposed to drying. Higher initial water content levels, and larger drying rates are present in lightweight concrete. Large, constant drying rates in concrete are observed both experimentally and numerically in the initial stage of drying. Numerical model developed is based on a generalized mass and heat transfer formulation for porous media. The numerical results obtained agree with the experimental data within the uncertainty of the input data.

Key words: concrete, porous medium, drying, gravimetric method, numerical simulation, heat and mass transfer

1 Uvod

Procesu izsuševanja je med svojo uporabno dobo izpostavljena velika večina betonskih konstrukcij. Količina proste (kemično nevezane) vode v betonu, ki ostane v porah strjenega betona po končanem procesu hidratacije, se zato spreminja tako s krajem kot s časom. Več mehanskih lastnosti, ki vplivajo na konstruktivno varnost betona, kot na primer tlačna in natezna trdnost ter modul elastičnosti, je odvisnih od vsebnosti vode v betonu zaradi interakcije trdne matrice in porne vode. Prav tako so s prisotnostjo vode povezani začetek in hitrost procesov propadanja betona, kot so krčenje zaradi sušenja, ki vodi k razpokanju materiala, korozija, zmrzovanje/odtajanje in eksplozivna porušitev betona med požarom.

Določevanje nivojev količine proste vode v betonu lahko zato odločilno pripomore k izboljšani oceni odpornosti in trajnosti materiala. Ta informacija lahko vpliva na izbiro preventivnih strategij v fazi načrtovanja ter omogoči razvoj ustreznih tehnik vzdrževanja, ki se uporabljajo med uporabno dobo konstrukcije. Ker so visoki nivoji vsebnosti vode, ki so prisotni med sušenjem na začetku procesa, odločilni za začetek in hitrost procesov propadanja, jim je potrebno posvetiti posebno pozornost.

Namen projekta, ki ga predstavljamo, je razvoj numeričnega modela za simulacijo masnih pretokov v nasičenem betonu med sušenjem. Razviti model smo preskusili s primerjavo rezultatov simulacije in eksperimentalno dobljenih podatkov za več vrst betona.

Poudarek je na začetni dobi sušenja, kjer so vsebnosti vode visoke, kar ima za posledico nizko odpornost betona. Uporaba lahkega nosilnega betona je vedno bolj pogosta, saj se zaradi manjše prostorninske mase občutno zmanjša lastna teža, dimenzije konstrukcije in poraba materiala, kar vpliva na večjo ekonomičnost gradnje. Zato smo eksperimentalne preiskave zasnovali tako, da je omogočila oceno vpliva vrste agregata na mehanizem sušenja.

Beton sestavljata dve porozni komponenti, agregat in cementni kamen. Obe komponenti ter njuna interakcija odločilno vplivata na strukturo, fizikalne karakteristike ter vedenje kompozitnega materiala. Poleg obeh komponent imajo na vedenje kompozitnega materiala velik vpliv tudi stična območja med agregatnimi delci in cementnim kamnom.

Za razliko od navadnih mineralnih imajo lahki agregati iz ekspandiranega skrilavca ali gline celičasto strukturo, visoko poroznost in grobo površino. Pri agregatih z grobo površino je potrebno upoštevati poleg nastanka stičnega območja tudi druge pojave, ki so posledica medsebojnega vpliva cementnega kamna in agregata. Eden izmed njih je tudi tako imenovano "mehansko zaklinjanje"¹, ki nastane po strjevanju cementne paste, ki je prodrla v votlinice in odprte pore na površini agregatnih delcev. Strjena cementna pasta deluje kot sistem majhnih moznikov, ki zagotavlja odlično povezavo med cementnim kamnom in agregatom, ter s tem zmanjšuje prepustnost in izboljšuje mehanske lastnosti lahkega betona. V normalnem betonu predstavlja stično območje najšibkejši sestavni člen kompozitnega materiala, saj je lokalni vodocementni faktor stičnega območja višji kot v cementnem kamnu. Prepustnost betona je zato višja, trdnost pa nižja. V primerjavi z normalnim betonom ima

¹ Dr. Jana ŠELIH, dipl.inž.gradb.
Gradbeni inštitut ZRMK
1000 Ljubljana, Dimičeva 12

lahak nosilen beton kljub manjši prostorninski masi zato skoraj enakovredne mehanske lastnosti.

Velik razpon velikosti por in znaten delež mezopor v cementnem kamnu z velikostjo med 1 in 25 nm ima za posledico veliko notranjo specifično površino betona reda velikosti $10 \text{ m}^2/\text{g}$ ter permeabilnost med 10^{-16} in 10^{-15} m^2 . Zaradi velike specifične površine je velik delež tekoče vode v adsorbiranem stanju. Fizikalno realističen model za opis sušenja betona mora biti zato zmožen opisati tok proste vode, gibanje adsorbirane vode ter gibanje vodne pare in zraka. Prav tako morajo biti vključene v model energijske spremembe, povezane z izhlapevanjem tekoče vode, ki spremljajo masni pretok. Perre in Degiovanni⁴ sta razširila Whitakerjevo⁵ formulacijo s tem, da sta vključila gibanje vezane vode. S tem njuna formulacija zadošča navedenim pogojem, numerični model, ki ga predstavljamo v tem članku, pa je zato osnovan na podobnem konceptu.

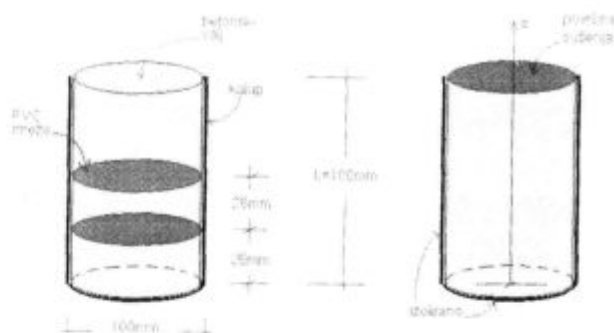
2 Eksperimentalni postopek

Količino vode smo merili v betonskih cilindrih s premerom in dolžino 100 mm z gravimetrično tehniko. Detajlni podatki o sestavi lahkega in normalnega betona, ki se razlikujeta po tipu uporabljenega grobega agregata (naraven gramoz za normalen, in agregat iz ekspandirane skrila za lahek nosilen beton) in lastnostih svežega betona, so zbrani v ⁶.

Cilindri so ostali pokriti s plastično folijo 12 ur po vlišanju. Po tem času smo jih postavili v vlažno komoro. Po končani dobi negovanja, med katero je hidratacija cementa potekala pri relativni vlažnosti 100%, smo cilindre izpostavili sušenju pri konstantni temperaturi $22 \pm 1^\circ\text{C}$ in relativni vlažnosti $50 \pm 5\%$. Tako med negovanjem kot med sušenjem so cilindri ležali pokončno s površino sušenja na vrhu, plastičnih kalupov pa med tem časom nismo odstranili. Na ta način so bočne in spodnja stranica izolirane, kar je omogočalo le enodimenzionalni masni pretok v smeri vzdolžne osi cilindra. Čas sušenja je bil med 0 in 90 dni, merjenja vsebnosti vode pa so potekala pri 0, 1, 3, 7, 28 in 90 dnevih sušenja.

Pred merjenjem lokalnih vsebnosti vode je bilo potrebno cilinder razlomiti na diske z debelino 25 mm. Lomljenje cilindra smo olajšali s plastjo tanke PVC mreže, ki je v betonu ustvarila rušilno površino, in smo jo vgrajevali v cilinder vsakih 25 mm (slika 1). Za oceno vpliva mreže na masni pretok smo izvedli ločen preizkus, katerega rezultati kažejo, da je vpliv mreže na pretok vode zanemarljiv⁶. Isti preskus nam pokaže, da je natančnost meritve med 5 in 10%.

Po razlomitvi cilindra na diske smo vsakega stehali, ga 3 dni sušili na 95°C ter ponovno stehali. Nadaljnja tehtanja suhih diskov so pokazala, da se njihova teža ne spreminja za več kot 0.1%. Razlika med "mokra" in "suha" teža je količina vode v disku, ki predstavlja njeno lokalno vsebnost. S tem lahko določimo razporeditev količine vode ob vzdolžni osi cilindra x za vsak čas



Slika 1: Shematična predstavitev preskusnega cilindra
Figure 1: Schematic representation of the cylinder tested

sušenja. Kot je razvidno s slike 1, leži orientacija osi x v smeri od izoliranega konca proti površini sušenja.

3 Matematična formulacija masnih in toplotnih pretokov v poroznem materialu

Uporabljena matematična formulacija masnih in toplotnih pretokov temelji na povprečenju fizikalnih količin na reprezentativnem elementarnem volumnu (REV)⁵. Celotna formulacija je opisana v ⁶, v tem razdelku pa podajamo le glavne vodilne enačbe. REV sestavljajo trdna, tekoča, vezana in plinasta faza, ki jih označujemo z indeksi s , l , b in g . Volumski deleži vseh faz so povezani z enačbo:

$$\epsilon_s + \epsilon_l + \epsilon_b + \epsilon_g = 1 \quad (1)$$

Plinasta faza je sestavljena iz vodne pare in zraka, ki ju označujemo z indeksoma 1 in 2.

V računu masnih pretokov obravnavamo trdno fazo kot togo in negibno, saj je vpliv krčenja zaradi sušenja na masne pretoke v betonu zlasti v začetku sušenja majhen, spremembe porne strukture zaradi hidratacije po začetku sušenja pa zanemarimo.

Kontinuitetno enačbo za celotno količino vode lahko zapišemo v obliki:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l(\epsilon_l + \epsilon_b) + \epsilon_g \bar{\rho}_1^g) + \Delta(\rho_b \bar{v}_b + \rho_1 \bar{v}_1 + \bar{\rho}_1^g \bar{v}_1) = 0, \quad (2)$$

kjer je $\bar{v}_i$ povprečen vektor hitrosti tekoče faze, ρ_1 pa gostota tekoče vode. $(\bar{\rho}_1^g \bar{v}_1)$ je celotni masni pretok vodne pare v plinasti fazi, $\bar{\rho}_1^g$ pa notranje povprečje gostote vodne pare v plinasti fazi. Gibanje vezane (adsorbirane) vode je difuziven proces, kjer je gibalna sila gradient koncentracije aktiviranih vodnih molekul, zato je masni pretok vezane vode $(\rho_b \bar{v}_b)$ sorazmeren gradientu vsebnosti vode.

Gibanje vodne pare sledi enačbi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}_1^g \epsilon_g) + \nabla(\bar{\rho}_1^g \bar{v}_1) = \bar{m}_1 + \bar{m}_b \quad (3)$$

$\bar{m}_1$ in $\bar{m}_b$ sta hitrosti izhlapevanja tekoče in vezane vode.

Hitrosti tekoče in plinaste faze lahko opišemo z Darcy-jev zakonom. Delni pritisk vodne pare je v

primerjavi s celotnim pritiskom plinaste faze majhen, zato lahko privzamemo, da se plinasta zmes vede kot idealni plin. Dokler je prosta tekoča voda prisotna, definiramo razliko pritiskov plinaste in tekoče faze kot kapilarni pritisk, ki je funkcija vsebnosti vode v poroznem materialu.

Toplotno energijsko enačbo lahko zapišemo kot:

$$(\rho c_p) \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + ((c_p)_l \rho_l \bar{v}_l + (c_p)_b \rho_b \bar{v}_b + \rho_g^e c_p^g \bar{v}_g) \cdot \nabla \bar{T} + \Delta h_{vap} (\bar{m}_l + \bar{m}_b) + h_s \bar{m}_b - \bar{\rho}_b \bar{v}_b \cdot \nabla h_s = \nabla (\lambda_{eff} \nabla \bar{T}) \quad (4)$$

Δh_{vap} je specifična toplota uparjenja, h_s diferencialna toplota vsrka, λ_{eff} efektivna toplotna prevodnost, (ρc_p) pa predstavlja povprečen produkt specifičnih toplot in gostot po REV.

Med celotnim procesom sušenja predpostavljamo, da je sistem v lokalnem termodinamičnem ravnotežju. Delni pritisk vodne pare je tako funkcija vsebnosti vode ter temperature.

Za prestopna koeficienta toplotnega in masnega pretoka α in β predpostavljamo, da sta konstantna po površini sušenja ter s časom. Skupni masni in toplotni tok na površini sušenja lahko zapišemo z enačbama:

$$(\rho_l \bar{v}_l + \rho_b \bar{v}_b + \bar{\rho}_l^e \bar{v}_l) \cdot \mathbf{n}_{boun} = \beta (\bar{p}_l^e - p_{l\infty}) \quad (5)$$

in

$$\lambda_{eff} \nabla \bar{T} + \Delta h_{vap} (\rho_l \bar{v}_l + \rho_b \bar{v}_b) + h_s \rho_b \bar{v}_b \cdot \mathbf{n}_{boun} = \alpha (\bar{T} - T_\infty), \quad (6)$$

kjer je $\mathbf{n}_{boun}$ enotni vektor, normalen na površino sušenja, $p_{l\infty}$ in T_∞ pa sta delni pritisk vodne pare in temperatura okolja. Skupni pritisk plinaste faze na površini sušenja je konstanten z vrednostjo atmosferskega pritiska, na izolirani površini pa so masni in toplotni pretoki nični. Na začetku procesa sušenja predpostavljamo, da sta temperatura in pritisk plinaste faze po obravnavanem telesu konstantna, kapilarni pritiski pa zadoščajo pogoju hidrostatsičnega ravnotežja.

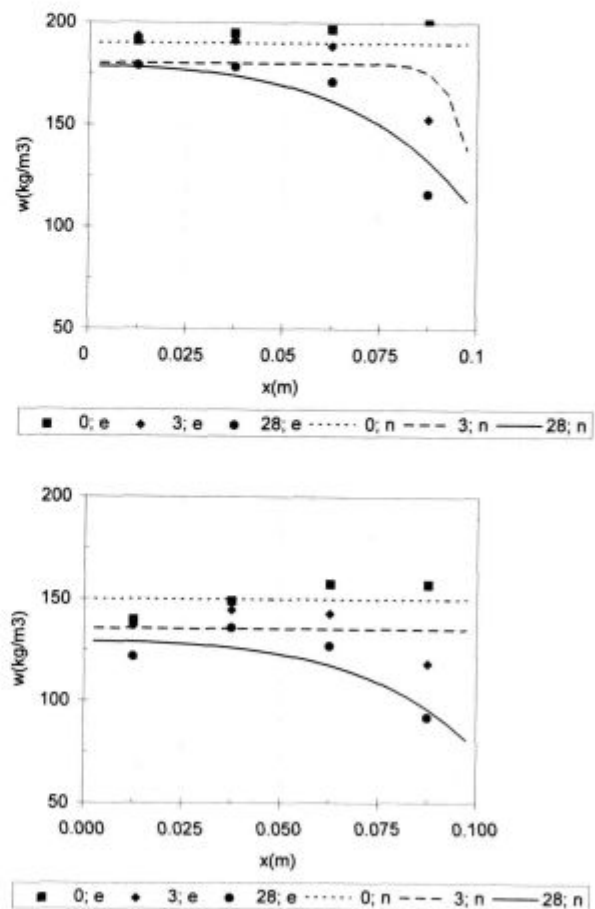
Za prostorsko diskretizacijo vodilnih diferencialnih enačb (2), (3) in (4) smo uporabili formulacijo kontrolnih volumnov⁷, kar zagotavlja v računu kontinuiteto pretokov na stiku kontrolnih volumnov. Vodilne enačbe integriramo prostorsko po kontrolnem volumnu ter po časovnem intervalu, kjer uporabimo polno implicitno shemo. Koeficienti, ki se pojavljajo v vodilnih enačbah, so močno odvisni od neznanih količin na koncu časovnega koraka, zaradi česar moramo znotraj vsakega časovnega koraka uporabiti iterativni postopek. Detajli numeričnega algoritma so zbrani v ⁶. Razviti numerični model je večdimenzionalen. Zaradi enosmerne narave eksperimenta pa smo za izračun rezultatov, ki so predstavljeni v naslednjem razdelku, uporabili enodimenzionalno verzijo modela.

4 Rezultati in diskusija

Funkciji, ki opisujeta sorpcijsko izotermo in difuzijski koeficient vezane vode, sta izbrani tako, da sta od-

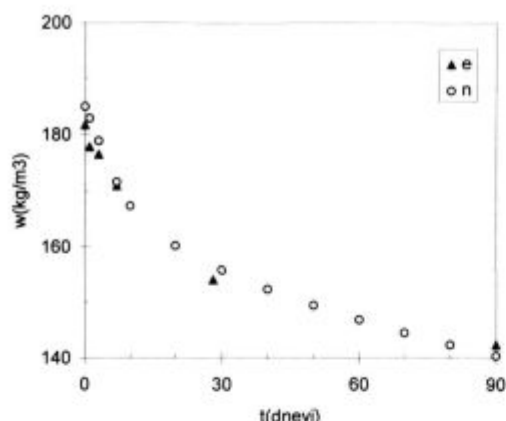
visni le od enega parametra, ireducibilne vsebnosti vode, ki označuje vrednost, nad katero prosta tekoča voda lahko obstaja. Izbira drugih konstitutivnih zvez, koeficienta masnega prestopa, specifične permeabilnosti, poroznosti in ireducibilne saturacije je podrobno opisana v ⁶. Vrednosti začetnih nivojev vsebnosti vode, uporabljenih v numerični simulaciji, izhajajo iz eksperimentalnih podatkov. Funkciji za opis relativne permeabilnosti plinaste in tekoče faze in odvisnost kapilarnega pritiska privzamemo po ⁸.

Na **sliki 2** so prikazane spremembe prostorske razporeditve vsebnosti vode w s časom, kjer predstavlja w maso vode v enoti volumna betona. Vidimo lahko značilne razlike v vedenju normalnega in lahkega betona. Tip agregata občutno vpliva na začetne nivoje vsebnosti in na dinamiko samega procesa sušenja. Vsebnost vode je na začetku sušenja višja v lahkem betonu, s povprečno vrednostjo 190 kg/m^3 za vodocementni faktor (v/c) 0,6, povprečna vrednost začetne vsebnosti v normalnem betonu pa je pri enakem v/c 150 kg/m^3 . Hitrost sušenja je



Slika 2: Vpliv vrste agregata na razporeditev količine vode v cilindru pri 0, 3 in 28 dnevih sušenja; eksperimentalni (e) in numerični (n) rezultati za 3 dni negovan beton z vodocementnim faktorjem 0,6: a) lahek, b) normalen beton

Figure 2: Influence of aggregate type upon moisture content profiles at 0, 3 and 28 days of drying; experimental (e) and numerical (n) results for 3 days moist cured concrete with water to cement ratio of 0,6: a) lightweight, b) normal weight concrete



Slika 3: Spremembe povprečne vsebnosti vode s časom: primerjava eksperimentalnih (e) in numeričnih (n) rezultatov za 1 dan negovan lahek nosilen beton z vodocementnim faktorjem 0,4

Figure 3: Changes of average moisture content with time: comparison of experimental (e) and numerical (n) results for 1 day moist cured lightweight concrete with water to cement ratio of 0,4

večja v lahkem nosilnem betonu. Sklepamo lahko, da daje lahki beton zaradi svoje zgradbe masnemu toku manjši upor, njegova prepustnost pa je zato višja.

V splošnem lahko opazimo, da se oblika profila razporeditve vsebnosti v začetku sušenja ne spreminja, medtem ko vrednosti vsebnosti vode močno padajo. Hitre spremembe vsebnosti in spremljajoče visoke, skoraj konstantne hitrosti sušenja lahko opazimo v prvih dnevih sušenja. Hitrost sušenja se začne spreminjati med 3 in 7 dnevi, ko opazimo blizu površine sušenja močno povečane gradientne količine vode in znižane povprečne vsebnosti vode po celotnem cilindru. To pomeni, da kapilarni tok v poroznem materialu ni več možen, in pora voda se giblje zaradi gradientov koncentracij.

Na **sliki 3** je razvidna primerjava eksperimentalno in numerično dobljenih povprečnih vrednosti vsebnosti za en dan negovan lahek beton z v/c 0,4. Ujemanje numeričnih in eksperimentalnih vrednosti je znotraj 3% za celotno analizirano časovno območje. Razlika med fazama sušenja je izrazita, saj so značilne vrednosti hitrosti sušenja, ki je sorazmerna naklonu krivulje na **sliki 3**, 0,18 kg/(m² dan) za prvo, in 0,02 kg/(m² dan) za drugo fazo do 90 dni sušenja.

Ujemanje eksperimentalnih in numeričnih podatkov je za vse analizirane primere znotraj negotovosti vhodnih podatkov, uporabljenih v simulaciji, in natančnosti merilne tehnike. V splošnem so razlike večje pri nizkih vrednostih vsebnosti vode, kjer dosežejo njihove vrednosti 20%.

5 Sklepne pripombe

Eksperimentalne in numerične raziskave sušenja smo izvedli na cilindrih, izpostavljenih sušenju na eni strani, narejenih iz normalno težkega in lahkega betona z različnimi vodocementnimi faktorji ter časi negovanja.

Visoko, konstantno hitrost sušenja smo opazili v začetni fazi sušenja za vse preskušene vrste betona. Dokler je hitrost sušenja konstantna, se oblika prostorske razporeditve vsebnosti vode med sušenjem ne spreminja. Takšno vedenje je opisano v literaturi za porozne materiale, različne od betona, za beton pa poroča o podobnem vedenju le Hashida⁹. Začetna faza traja od 3 do 7 dni. Obstoj konstantne hitrosti sušenja v tej fazi nam pokaže, da je v porah betona prisoten kapilaren tok proste tekoče vode. Po koncu prve faze sušenja opazimo postopen prehod iz območja prevladujočega kapilarnega toka v območje, kjer je prevladujoči gibalni mehanizem difuzija. Začne se druga faza sušenja, kjer so vsebnosti vode vzdolž celotnega cilindra močno zmanjšane, gradienti v bližini površine sušenja pa se povečajo.

Normalno težak beton ima v primerjavi z lahkim nosilnim betonom z enakim vodocementnim faktorjem in časom negovanja nižje začetne vsebnosti vode. To je posledica grobe porozne strukture lahkega agregata in uporabljenega mešalnega postopka, v katerem lahek agregat predhodno namočimo. Med sušenjem so spremembe vsebnosti vode s časom večje za lahek beton.

Razviti numerični model temelji na posplošeni formulaciji masnih in toplotnih pretokov v poroznem materialu ter daje kot rezultat prostorsko razporeditev vsebnosti vode, temperatur in njihovih sprememb s časom. S tem modelom smo simulirali vedenje vseh vrst betona, ki so bile eksperimentalno preskušene, in kot rezultat smo dobili razporeditve vsebnosti v določenih časovnih presledkih. Model je močno odvisen od uporabljenih konstitutivnih zvez, ki morajo biti določene eksperimentalno. Njegovi rezultati se ujemajo z eksperimentalnimi podatki znotraj negotovosti vhodnih podatkov, konstitutivnih relacij ter napake merilne tehnike.

6 Zahvala

Članek predstavlja del raziskav, ki so potekale v okviru doktorskega študija avtorice na University of New Brunswick v Kanadi. Avtorica se zahvaljuje Ministrstvu za znanost in tehnologijo Republike Slovenije za financiranje njenega študija v tujini.

7 Literatura

- ¹ M. H. Zhang in O. E. Gjorv, Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, *Cement & Concrete Research*, 20, 1990, 610-618
- ² J. F. Daian, Condensation and isothermal water transfer in cement mortar: Part I - pore size distribution, equilibrium water condensation and imbibition, *Transport in Porous Media*, 3, 1988, 563-589
- ³ P. K. Mehta, *Concrete: structure, properties and materials*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, ZDA, 1986
- ⁴ P. Perre in A. Degiovanni, Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes: séchage du bois à basse et à haute température, *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 33, 1990, 2463-2478
- ⁵ S. Whitaker, Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying, *Advances in Heat Transfer*, 13, 1977, 119-200

- ⁶ J. Šelih, Movement of water during drying of fully saturated concrete, doktorska disertacija, University of New Brunswick, Fredericton, Kanada, 1994
- ⁷ S. V. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere Publ. Corp., New York, NY, ZDA, 1980

- ⁸ A. E. Scheidegger, *The physics of flow through porous media*, University of Toronto Press, Toronto, Kanada, 1974
- ⁹ H. Hashida, K. Tanaka, in M. Koike, Moisture distribution in concrete before and after application of the finish, *Building Research and Practice*, 5, 1990, 303-308