

OŠETROVANIE ČERSTVÉHO BETÓNU – 6. ODPAROVANIE VODY, KONVENČIA A SKUTOČNOSŤ ■ CONCRETE CURING – 6. WATER EVAPORATION, CONVENTION AND REALITY

Peter Briatka, Peter Makýš

V ostatnom pokračovaní cyklu o ošetrovaní betónu (Beton TKS 6/2011) sme si predstavili a popísali model návrhu vnútorného ošetrovania (IC) tak, aby nevznikali v betóne trhliny. V modeli sa značná pozornosť venuje výpočtu potreby vody na ošetrovanie. Návrh pokrýva straty vody z betónu všetkými známymi mechanizmami. Popísal sa rámcový postup výpočtu. Funkcia popisujúca dynamiku (intenzitu E) straty vlhkosti do okolitého prostredia však zostala neznaná. Existuje viacero matematických modelov popisujúcich stratu vlhkosti z betónu odparovaním do okolitého prostredia. V tomto článku ich konfrontujeme s výsledkami experimentálneho overovania straty vlhkosti z betónu do okolitého prostredia. ■ In the last paper of this cycle on concrete curing (in Beton TKS, Vol. XI, no.6, 2011), we presented and described design model of internal curing (IC) in order to avoid concrete cracking. Large part of the model was dedicated to calculation of demand on water for curing. The design covers losses of water from concrete via all known mechanisms. There was described a framework of the calculation. However, the function representing dynamics (intensity E) of water loss to ambient environment stayed undisclosed. There are several mathematical models describing loss of water to the ambient environment via evaporation. In this paper, we confront them with results of the experimental study of water loss from concrete to the ambient environment.

SÚČASNÝ VÝPOČET MNOŽSTVA VODY NA IC

Štruktúra samotného výpočtu množstva vody na vnútorné ošetrovanie (IC) sa člení do dvoch častí – výpočet dávky vody podľa teórie chemického zmršťovania (tzv. sealed system) a výpočet podľa teórie vonkajšieho vysychania (tzv. unsealed system). Celkové množstvo vody pridávané do betónu s IC musí pokryť spotrebu na hydratáciu a straty do okolitého prostredia.

Do výpočtu vstupujú už zadané vstupné informácie. Okrem už popísaných sa zadávajú aj očakávané pravdepodobné parametre expozície betónu prostrediu s teplotou prostredia T_{AMB} [°C], s povrchovou teplotou betónu T_C [°C], s relatívnou vlhkosťou prostredia RH [%] a rýchlosťou vetra v_w [km/h]. Pre výpočet sú dôležité aj vstupné

konštrukčné a technologické informácie o hrúbke konštrukcie h [mm], dobe pôsobenia ošetrovania n [h] a účinnosti iného aplikovaného ošetrovania η [-].

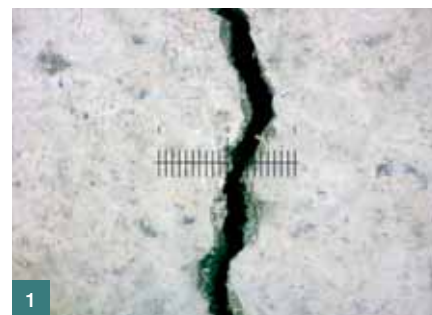
Výpočet dávky vody podľa teórie chemického zmršťovania (CS) je vhodný prednostne pre konštrukcie, z ktorých bude znemožnená akákoľvek strata vlhkosti do prostredia, alebo pre betónové konštrukcie, ktoré budú intenzívne ošetrované inou metódou ošetrovania pre úplné pokrytie strát vlhkosti vonkajším vysychaním. Z uvedeného vyplýva, že výpočet vychádza z nutnej rovnosti medzi stratou vlhkosti samovysychaním resp. na chemické zmršťovanie V_{CS} [-] a vodou dodanou ošetrovaním $V_{EW,i}$. Presnejšie sú vzťahy pre výpočet popísané v predchádzajúcom pokračovaní cyklu [1]. Z hľadiska zamerania tohto článku je dôležitá druhá časť výpočtu straty vody z betónu – odparovaním do okolitého prostredia (DS).

VÝPOČET MNOŽSTVA VODY POKRÝVAJÚCEHO STRATY ODPAROVANÍM

Zatiaľ čo výpočet vody pre pokrytie CS neuvažuje a nezahŕňa podmienky prostredia a konštrukcie, tieto priamo vstupujú do výpočtu straty vody podľa teórie vonkajšieho vysychania. Tieto prakticky riadia celý proces odparovania vody z betónu.

Zdanlivo statický systém je v skutočnosti dynamický. Nestacionárne vlhkosťové pole je determinované meniacim sa povrchom betónu v kontakte s okolitým prostredím, meniacou sa vlhkosťou cementového tmelu (stupňom vyplnenia kapilár pórovým roztokom) a klesajúcim vlhkosťovým gradientom, rastúcou hutnosťou tuhnuceho a tvrdnúceho cementového tmelu (narastajúci difúzny odpor).

Časový priebeh straty vlhkosti do okolitého prostredia sa z hľadiska dynamiky (intenzity) rozdeľuje do troch fáz. V prvej fáze dochádza k odparovaniu tzv. vypotenej vody (bleed water) z povrchu betónu [2]. Postupne sa oblasť odparovania presúva hlbšie do cementového tmelu (fáza II). Medzi fázou I a II je dobre pozorovateľný pokles intenzity straty vlhkosti. V II. fáze sa vyprázdňujú pôvodne saturované kapiláry cementového tmelu, čo vyvolávajú



Obr. 1 Ilustračný obrázok – trhlina v betóne ■ Fig. 1 Illustrative picture – crack in concrete

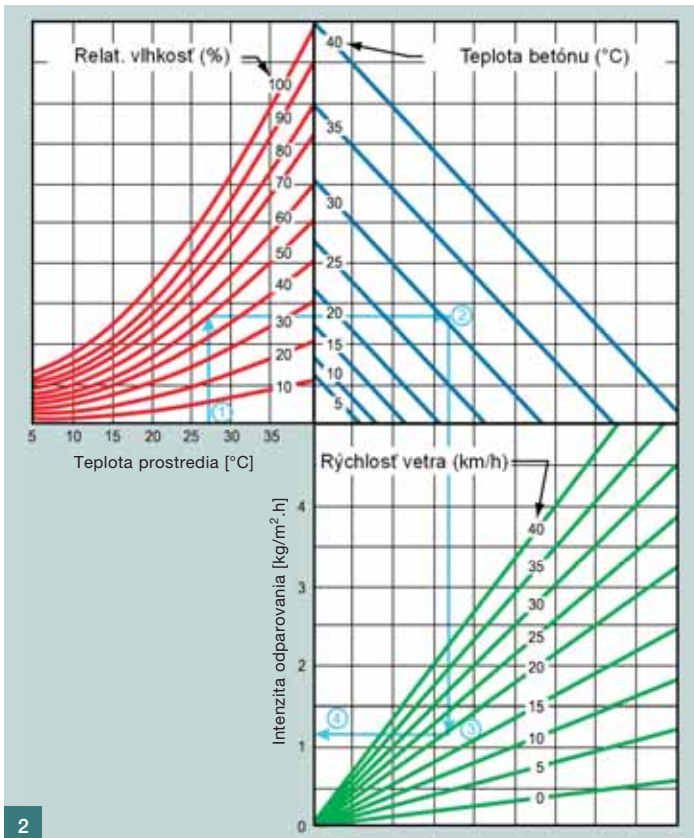
Obr. 2 Model straty vlhkosti (intenzity odparovania vody) podľa Menzela (upravené z [9, 15]) ■ Fig. 2 Model of loss of moisture (intensity of evaporation) by Menzel (modified from [9, 15])

Obr. 3 Schéma meracej a klimatizačnej aparatury ■ Fig. 3 Scheme of measuring and (air)conditioning apparatus

kapilárne napätia prejavujúce sa v cementovom tmele. Ak medzičasom systém začne tuhnúť, vertikálne deformácie resp. kolaps systému sa obmedzí, čo začína spôsobovať generovanie všesmerných napätí. Oblasť odparovania sa presúva hlbšie do cementového tmelu (fáza III) a vplyvom zväčšujúcej sa hĺbky oblasti odparovania a rastúcej hutnosti cementového tmelu dochádza k výraznému spomaleniu odparovania [2, 3, 9, 14].

V súčasnosti je známych viacero matematických modelov odparovania vody v závislosti od podmienok okolitého prostredia. Najčastejšie sa však v odbornej, technickej ale i vedeckej literatúre stretávame s grafickou podobou nomogramu z 1960 (spracoval Bloem pre NRMCA [4]) pôvodného Menzelovho modelu (1954, obr. 2). Menzel sa vo svojom diele [2] nechal inšpirovať Daltonom [5].

Súčasná podoba nomogramu je akceptovaná naprieč prakticky celou odbornou verejnosťou, napr. [7, 8, 9, 10]. Popisuje intenzitu odparovania vody $E_{E,M}$ [kg/m².h] z voľnej vodnej hladiny ako funkciu určujúcich činiteľov okolitého prostredia, teploty povrchu betónu T_C [°C]; teploty prostredia T_{AMB} [°C]; relatívnej vlhkosti RH [%] a rýchlosti prúdenia vzduchu v_w [km/h]. Je preto zrejmé, že jeho platnosť sa výrazne časovo obmedzuje na krátke obdo-



2

bie tesne po úprave povrchu betónovej konštrukcie kedy sa odparuje tzv. vypotená voda (bleed water) [11].

Intenzita straty vlhkosti z povrchu betónu je závislá od intenzity odlučovania vody z betónu, podmienok prostredia, textúry povrchu a ošetrovania betónu [11, 12, 13]. Model je vhodný pre kalkuláciu straty vlhkosti len vo veľmi mladom veku betónu a často sa spája s plastickým zmrašťovaním.

V prípadnej praktickej aplikácii modelu stojí tento (zo svojej podstaty) na strane bezpečnosti. To znamená, že ošetrovacia voda potrebná (podľa modelu) na pokrytie odparenej vody bude už po prechode do II. fázy výrazne prevyšovať potreby. Navyše model poskytuje iba rámcovú informáciu o tom, ako jednotlivé činitele prispie-

vajú k strate vlhkosti z betónu. Model nezohľadňuje ani ochladzujúci efekt odparovania vody z povrchu betónu, a aj preto sa potýka s výraznou nepresnosťou, ktorá (podľa [11]) dosahuje ± 25 % pri E_E do 1 kg/m².h a pri vyšších intenzitách systematicky vykazuje vyššie hodnoty o približne 50 %.

$$E_{E,M} = 5 \left((T_C + 18)^{2,5} - \left(\frac{RH}{100} (T_{AMB} + 18)^{2,5} \right) \right) \cdot (v_W + 4) \cdot 10^{-6} \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}] \quad (1)$$

S rastúcim vekom betónu je potrebné vzťah modifikovať. Jednou z možností je zahrnúť do výpočtu už spomenutú, časovo závislú, intenzitu odlučova-

nia vody z betónu. V konečnom dôsledku sa dospeje ku vzťahu (2) [11, 12] pre výpočet intenzity odparovania vlhkosti z betónu E_C [kg/m².h], kde do výpočtu vstupuje vek betónu t [h] a časová konštanta a (= 3,75 h pre betóny a 6,16 h pre malty [12]). Vzťah (2) (model podľa Al-Fadhala) možno chápať len ako platformu pre danú receptúru, nakoľko kvantifikovanie intenzity odlučovania vody z betónu ešte nebolo vykonané. Pre návrh ošetrovania betónu sa z dovtedy známych meraní odvodil tu zavedený Mix design model, ktorý slúžil ako prvotný odhad vstupujúci do prvotného návrhu IC [1] a je charakterizovaný vzťahom (3), kde t je vek betónu [h].

$$E_C = E_E \cdot e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^{1,5}} \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}] \quad (2)$$

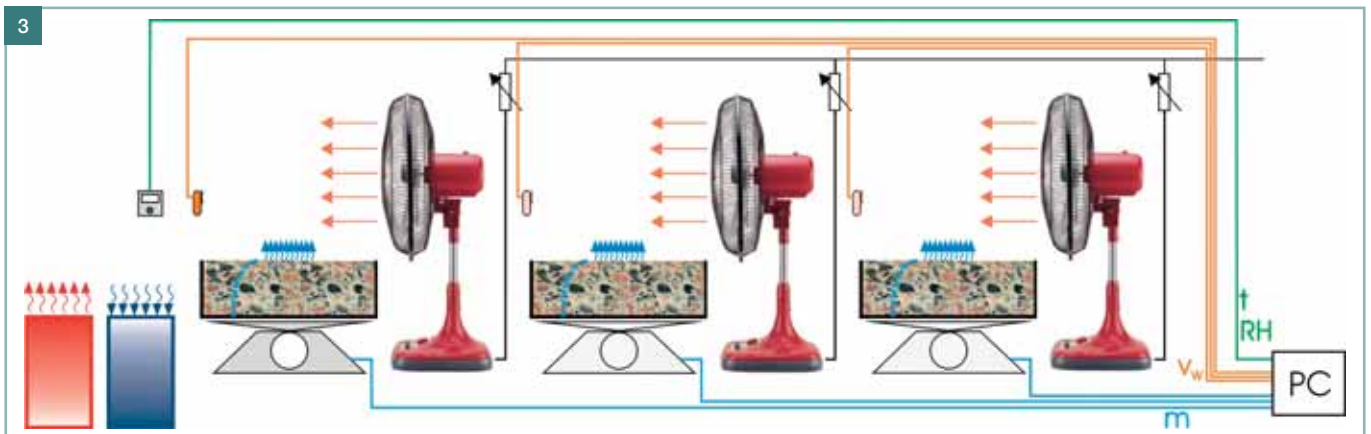
$$E_E = 0,2373 \left(\frac{1}{t^{0,5411}} \right) \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}] \quad (3)$$

Ako to demonštruje aj obr. 5 všetky uvedené modely majú svoje väčšie, či menšie nedostatky a necharakterizujú skutočnosť. Existuje viacero nekomplexných modelov, no všetky zlyhávajú (vykazujú významné chyby) pri prechode z I. do II. fázy odparovania. Vykonalo sa experimentálne overenie straty vlhkosti z betónu v čase pri určitých okrajových podmienkach prostredia a na základe neho sa pristúpilo k spresneniu výpočtu množstva vody potrebnej na IC tak, aby pokryla straty vody odparovaním.

EXPERIMENTÁLNE OVERENIE

Metodika a skúšobná zostava (aparátúra)

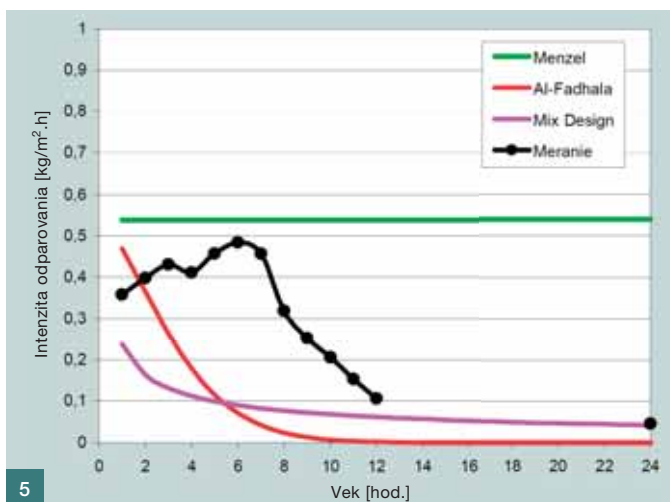
Meranie straty vlhkosti z betónu do okolitého prostredia sa navrhlo vykonať v klimatizačnej komore, v ktorej sa regulovali tri parametre prostredia – teplota, vlhkosť a rýchlosť prúdenia vzduchu (obr. 3).



3



4



5

Strata vlhkosti sa monitorovala zmenou hmotnosti vzoriek v pravidelných intervaloch (á 1 h) vo formách až do veku približne 48 h. Tri vzorky, pričom jednou vzorkou sa rozumie sada troch skúšobných telies (obr. 4), boli vystavené pôsobeniu okolitého prostredia s parametrami $T_{AMB} = 35 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_C = 40 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $RH = 50,5 \%$ a $v_W = 3 \pm 0,5 \text{ km/h}$.

Pre skúšky sa použil portlandský cement CEM I 42,5 N s mernou hmotnosťou $3\,077 \text{ kg/m}^3$. Chemické zmršťovanie použitého cementu bolo 7 % a jemnosť stanovená podľa Blaina $344,77 \text{ m}^2/\text{kg}$. Začiatok tuhnutia sa podľa STN EN 1015-9 stanovil 185,3 min, pričom koniec tuhnutia sa zistil v 254,6 min. Ako plastifikačná prísada (WRA) sa použil superplastifikátor Berament HT2 s účinnou látkou na báze polykarboxylátu (v dávke 0,3 %). Vodný súčiniteľ betónu sa použil 0,42.

Okrem týchto meraní prebiehali v dlhšom časovom období aj merania straty vody z betónu pri rôznych kombináciách okrajových podmienok a rôznych metódach ošetrovania betónu. Konkrétne sa použili kombinácie okrajových podmienok v intervaloch $T_{AMB} = 20$ až $35 \text{ }^\circ\text{C}$; $RH = 30$ až 70% a $v_W = 3$ až 12 km/h . Tie sa však použili len do úpravy Menzelovho modelu pre 1. fázu odparovania.

Výsledky

Orientačné porovnanie existujúcich modelov a skutočne zistenej intenzity odparovania vody z betónu poskytuje obr. 5.

Z neho je zrejmé, že model podľa Menzela dáva konštantnú intenzitu odparovania vody bez ohľadu na reológiu betónu. S ohľadom na zistenú nepresnosť modelu a porovnaním so skutočne meraným priebehom možno

konštatovať, že pomerne dobre charakterizuje stratu vlhkosti z betónu vo veľmi mladom veku betónu. Tvrdenie podporuje aj pomerne nízky použitý vodný súčiniteľ.

Zvyšné dva modely podľa Al-Fadhala aj (empirický) Mix Design (odvodený pri meraniach podľa ASTM 1579-06) zohľadňujú zmeny v štruktúre betónu súvisiace s hydratáciou. Nezahŕňajú však isté obdobie veku betónu, počas ktorého sa intenzita odparovania vody z povrchu rovná alebo približuje intenzite odparovania vody z voľnej vodnej hladiny (ako ju definuje Menzelov model). Toto obdobie zodpovedá prvej fáze, t.j. keď intenzita transferu vlhkosti z cementového tmelu na povrch betónu (intenzita odlučovania) vody sa rovná intenzite odparovania podľa Menzela.

Ako možno pozorovať z obr. 5, posunutím oboch alternatívnych modelov do veku približne 6 h možno získať reálnejší model. Tu sa žiada zdôrazniť potreba úpravy modelu podľa Al-Fadhala v intenciách zvýšenia intenzity odparovania vody v mladom veku tak, ako to načrtáva skutočné meranie.

APLIKÁCIA / NÁVRH ÚPRAVY MENZELOVHO MODELU

Výpočet straty vody z betónu sa na základe meraných intenzít rozdeľuje do dvoch častí. V prvej časti sa uvažuje s intenzívnou a rovnomernou stratou vlhkosti odparovaním z povrchu betónovej konštrukcie. Z vykonaných meraní pri expozícii prostrediu s rôznymi okrajovými podmienkami sa zistilo, že v počiatočnom veku betónu (rádovo 6 h) možno odparovanie vody aproximovať na konštantné a koreluje s Menzelovým modelom.

V druhej fáze dochádza vplyvom synergického pôsobenia útlmu hydratácie

(uvolňovania hydratačného tepla) a intenzívneho formovania pevných štruktúr k radikálnemu poklesu straty vlhkosti do okolitého prostredia s tým, že do 24 h klesne prakticky na $0,25 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ a limitne sa blíži nule (obr. 6).

Samotný výpočet podľa teórie vonkajšieho vysychania začína od zjednodušeného modelu (obr. 6) pre určenie intenzity straty vlhkosti odparovaním $E_{E,I}(t)$ a $E_{E,II}(t)$ [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$] v určitom čase t . Výpočet podľa teórie vonkajšieho vysychania po dobu n hodín začína od modelu intenzity straty vlhkosti $E_{E,I}(t)$ a $E_{E,II}(t)$.

Intenzita odparovania vlhkosti v čase (t), prvej fáze $E_{E,I}(t)$ sa určí úpravou Menzelovho modelu (1) korekčnou funkciou f_1 , vzťah (4). Pri voľbe korekčnej funkcie sa vychádzalo zo zistenej najlepšej zhody medzi Menzelovým modelom a skutočným meraním, t.j. pri intenzite straty vlhkosti cca $550 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$, resp. $0,55 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ (obr. 7).

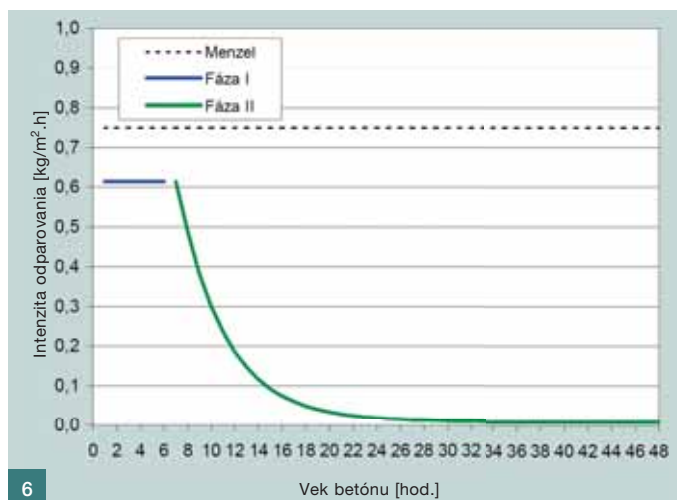
V prvej fáze, vo veľmi mladom veku betónu (približne do 7 h) je možné intenzitu straty vlhkosti $E_{E,I}$ považovať za konštantnú. Určí sa modifikovaným Menzelovým modelom podľa vzťahu (5). Celková strata $V_{L,I}$ vody odparovaním v prvej fáze sa potom určí jednoducho podľa vzťahu (6).

$$f_1 = e^{(E_{E,M} - 0,55)} \quad [-] \quad (4)$$

$$E_{E,I} = \frac{E_{E,M}}{e^{(E_{E,M} - 0,55)}} \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}] \quad (5)$$

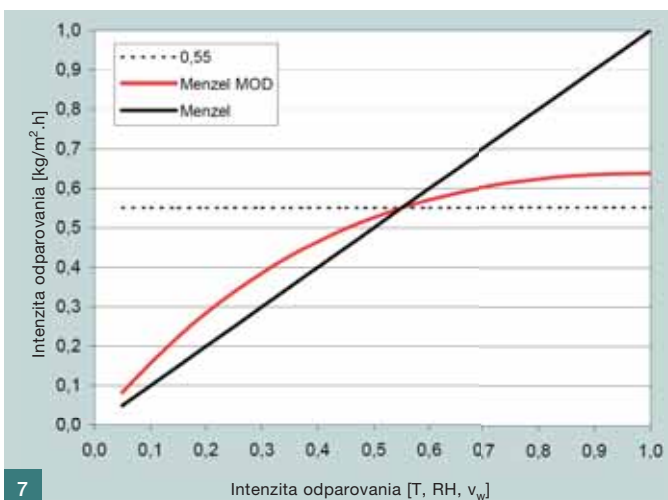
$$V_{L,I} = \sum_{t=1}^6 E_{E,I}(t) \quad [\text{kg/m}^2] \quad (6)$$

V druhej fáze dochádza vplyvom synergického pôsobenia útlmu hydratácie (uvolňovania hydratačného tepla) a intenzívneho formovania pevných štruktúr k radikálnemu poklesu straty



6

Vek betónu [hod.]



7

 Intenzita odparovania [T, RH, v_w]

vlhkosti do okolitého prostredia (obr. 6) s tým, že do 24 h klesne prakticky na 0,25 kg/m².h a limitne sa blíži nule. Vo veku 48 h sa dosahuje intenzita straty vlhkosti cca 0,01 až 0,02 kg/m².h. Výslednú formu funkcie odparovania vody z betónu v druhej fáze definuje vzťah (7), kde t [h] je vek betónu a koeficient 4 zohľadňuje druh a triedu cementu CEM I 42,5 N. Celková strata $V_{L,II}$ vody odparovaním v druhej fáze sa potom určí jednoducho podľa vzťahu (8).

$$E_{E,II} = E_{E,I} \cdot e^{-\left(\frac{t-7}{4}\right)} + 0,015 \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}] \quad (7)$$

$$V_{L,II} = \int_{t=7}^n E_{E,II} (t) \quad [\text{kg/m}^2] \quad (8)$$

ZÁVER

Správne stanovené množstvo vody potrebnej pre IC betónu je kľúčový parameter pre optimálny návrh zloženia čerstvého betónu, optimálne vlastnosti zatvrdnutého betónu a hlavne pre úspešné fungovanie IC a zamedzenie poškodeniu betónovaných (najmä) plošných konštrukcií. Podarilo sa pri najmenšom poukázať na nedostatky celosvetovo akceptovaného modelu výpočtu intenzity odparovania vody z betónu a v rámci dostupného množstva výsledkov laboratórnych meraní sa navrhli úpravy tohto modelu tak, že sa rozdelil do dvoch fáz charakterizovaných dvomi rozličnými funkciami. Vytvorili sa tým predpoklady jednoduchému a významnému spresneniu výpočtu, čo nutne musí mať dopad aj na výsledky doposiaľ vykonaných skúšok účinnosti IC, a to tých, ktoré vychádzali z výpočtu potreby vody na ošetrovanie so zohľadnením vonkajšieho vysychania (DS).

Literatúra:

- [1] Briatka P., Makýš P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – 5. Návrh receptúry čerstvého betónu s vnútorným ošetrovaním, Beton TKS, Vol. XI, No. 6, Beton TKS, Praha, 2011, pp: 36–42
- [2] Menzel C. A.: Causes and Prevention of Crack Development in Plastic Concrete, in Proc., Portland Cement Ass. Annual Meeting, 1954, pp:130–136
- [3] Hover Kenneth C.: Evaporation of Water from Concrete Surfaces, ACI Materials Journal, Vol. 103, No. 5, ACI, Farmington Hills, 2006. pp:128–133
- [4] Bloem D.: Plastic Cracking of Concrete, Engineering Information, National Ready Mixed Concrete Association/National Sand and Gravel Association, July 1960, 2 pp.
- [5] Dalton J.: Experimental Essays on Evaporation, Manchester Lit. Phil. Soc. Mem. Proc., Vol. 5, 1802, pp. 536–602
- [6] Uno P. J.: Plastic Shrinkage Cracking and Evaporation Formulas, ACI Materials Journal, Vol. 95, No. 4, ACI, Farmington Hills, 1998, pp: 365–375.
- [7] Briatka P., Makýš P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – 4. Konvenčný návrh ošetrovania pomocou ľahkého kameniva, Beton TKS, Vol. 10, No. 6, Beton TKS, Praha, 2010, pp:40–43
- [8] Bajza A., Rouseková I.: Technológia betónu, Jaga Group, Bratislava, 2006, p:190
- [9] ACI Committee 308: Guide to Curing Concrete (ACI 308R–01), ACI, Farmington Hills, MI, 2001, 31 pp.
- [10] Concrete Q&A: Estimating Evaporation Rates to Prevent Plastic Shrinkage Cracking, Concrete International, Vol. 29, No. 3, ACI, Farmington Hills, 2007, pp: 80–82
- [11] Al-Fadhala M., Hover M.: Rapid evaporation from freshly cast concrete and the Gulf environment. Construction and Building Materials, 2001
- [12] Schindler A., Ruiz J., Rasmussen R., Chang G., Wathne L.: Concrete pavement temperature prediction and case studies with the FHWA HIPERPAV models, Cement and Concrete Composites, 2003
- [13] Rochefort J., McCullough B., Dossey T., Fowler D.: Evaluation of the Effects of the Timing Operation on the Performance of Portland Cement Concrete Pavements, Research Report 4978–1, The Center for Transportation Research, Austin, October 2000
- [14] SP–15(05): Field Reference Manual: Standard Specifications for Structural Concrete ACI 301–05, ACI, Farmington Hills, 2005. p: 660
- [15] Briatka P.: Úvod do ošetrovania betónu 1 – V letnom období, Materiály pro stavbu, Vol. XVII., No. 1, Business Media CZ, Praha, 2011, pp: 16–20

Publikované informácie sú čiastkovými závermi dizertačnej práce „Ošetrovanie plošných betónových konštrukcií proti strate vlhkosti“, ktorú materiálne podporili STU v Bratislave, TSÚS Bratislava, LIAS Vintířov, PCLA Ladce a BASF.

Ing. Peter Briatka, PhD.
TSÚS

Studená 3, 821 04 Bratislava
e-mail: briatka@tsus.sk
briatka.p@gmail.com



Doc. Ing. Peter Makýš, PhD.
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 813 68 Bratislava



Obr. 4 Axiálne ventilátory regulované pomocou reostatov ■ Fig. 4 Axial fans controlled by rheostats

Obr. 5 Porovnanie viacerých modelov a reálne dosiahnutých výsledkov pri ($T_{AMB} = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$; $T_C = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$; RH = 50 % a $v_w = 3 \text{ km/h}$; $w/c = 0,42$) ■

Fig. 5 Comparison of several models and measured results at ($T_{AMB} = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$; $T_C = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$; RH = 50 % a $v_w = 3 \text{ km/h}$; $w/c = 0,42$)

Obr. 6 Model intenzity odparovania vody z betónu ■ Fig. 6 Model of intensity of evaporation water from concrete

Obr. 7 Úprava a transformácia Menzelovho modelu podľa meraných intenzít straty vlhkosti ■ Fig. 7 Modification and transformation of Menzel's model according to measured intensities of evaporation