

ДГКМ
ДРУШТВО НА
ГРАДЕЖНИТЕ
КОНСТРУКТОРИ НА
МАКЕДОНИЈА

Партизански одреди 24,
П.Фах 560, 1001 Скопје
Северна Македонија

MASE
MACEDONIAN
ASSOCIATION OF
STRUCTURAL
ENGINEERS

Partizanski odredi 24,
P. Box 560, 1001 Skopje
North Macedonia

CS - 11



mase@gf.ukim.edu.mk
http://mase.gf.ukim.edu.mk

КОНТРОЛА НА ОТВОР НА ПУКНАТИНИ КАЈ АБ ГРЕДИ: ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ И АНАЛИТИЧКИ РЕЗУЛТАТИ

Евгенија СТОЈКОСКА¹, Марија ДОЦЕВСКА², Дарко НАКОВ³, Тони
АРАНГЕЛОВСКИ⁴, Горан МАРКОВСКИ⁵

АПСТРАКТ

За да една конструкција го задоволи пропишаното ниво на доверливост, неопходно е да биде проектирана така што ниту една од граничните состојби на носивост и употребливост нема да биде достигната во предвидениот век на експлоатација. Со мерките за осигурување на потребната трајност, директно се обезбедува нејзината употребливост, а се влијае и на нејзината носивост, која може да биде загрозна поради дотраеноста на градбата. Ограничувањето на отворот на пукнатините, што првенствено води кон заштита на арматурата од корозија, е еден од основните предуслови за обезбедување на пропишаната трајност.

И покрај големиот опсег на сознанија добени преку многубројните експериментални и теоретски истражувања, сè уште постојат одредени дилеми околу имплементацијата на моделите за пресметка на пукнатините дадени во кодовите. Со цел да се утврди влијанието на долготрајниот товар врз граничните состојби на пукнатини и да се процени нивото на точност на разгледуваните аналитички модели, реализирана е експериментална програма во лабораториски простор со постојани амбиентални услови која се состои од изработка и следење на осум АБ греди. Во разгледуваниот период од една година кај шест од гредите се појавуваат пукнатини чија појава и временски развој се прикажани во овој труд. Исто така, даден е и преглед на резултатите добиени со употреба на неколку современи аналитички модели за прогнозирање на пукнатини.

Прикажаните резултати покажуваат дека аналитичките модели во современите стандарди можат со задоволителна точност да ги прогнозираат граничните состојби на пукнатини при долготрајно дејство на товар.

Клучни зборови: постојан товар; отвор на пукнатини; растојание помеѓу пукнатини.

¹ М-р, Градежен факултет, Универзитет “Св. Кирил и Методиј”, Скопје, Република Северна Македонија, stojkoska@gf.ukim.edu.mk

² М-р, Градежен факултет, Универзитет “Св. Кирил и Методиј”, Скопје, Република Северна Македонија, docevska@gf.ukim.edu.mk

³ Проф. д-р, Градежен факултет, Универзитет “Св. Кирил и Методиј”, Скопје, Република Северна Македонија, nakov@gf.ukim.edu.mk

⁴ Проф. д-р, Градежен факултет, Универзитет “Св. Кирил и Методиј”, Скопје, Република Северна Македонија, arangelovskitoni@gf.ukim.edu.mk

⁵ Проф. д-р, Градежен факултет, Универзитет “Св. Кирил и Методиј”, Скопје, Република Северна Македонија, markovski@gf.ukim.edu.mk

1. ВОВЕД

За да може да се обезбеди посакуваното однесување на конструкцијата или некој нејзин дел во експлоатација потребно е, освен граничната состојба на носивост, да се контролираат и граничните состојби на употребливост. Нивната контрола претставува доказ дека при најнеповолна комбинација на експлоатационите товари нема да се пречекорат однапред пропишаните вредности, водејќи сметка и за времетраењето на товарот [1].

Вообичаено, кај армиранобетонските конструкции се врши проверка на граничните состојби на употребливост со цел да се осигура нејзиниот изглед, функционалност, па дури и да се обезбеди нејзината трајност. Во современите стандарди за проектирање (EC2 EN 1992 [2], MC10 [3], ACI 318 и сл.), граничните состојби на употребливост се дефинираат преку обезбедување на трите параметри и тоа: ограничување на напрегањата во материјалот, ограничување на отворот на пукнатините и нивното меѓусебно растојание и ограничување на деформацијата на конструкцијата. Ограничувањето на отворот на пукнатините, како и соодветно обезбедениот заштитен слој, што првенствено водат кон заштита на арматурата од корозија, се едни од основните, а можеби и најважни предуслови за обезбедување на пропишаната трајност.

Граничните состојби на употребливост може да се анализираат со аналитички и нумерички модели кои денес наоѓаат се поголема примена во софтверските програми за анализа на конструкциите. Аналитичките модели кои најчесто се користат во прописите и препораките се базираат на определени поедноставувања и препораки во однос на однесувањето на бетонот и арматурата под дејство на товарите.

И покрај големиот опсег на сознанија добени преку многубројните експериментални и теоретски истражувања, сè уште постојат одредени дилеми околу имплементацијата на моделите за пресметка на пукнатините дадени во кодовите. Повеќето модели се базираат на емпириски изрази, па за да се добие модел за практична примена потребно е истиот да се надополни со резултати од експериментални испитувања.

За да се направи контрола на пукнатините во реална конструкција и за да може полесно да се користат моделите дадени во стандардите, не е доволно да се направат краткотрајни испитувања за да се разбере механизмот на појава на пукнатините, туку да се земат предвид долготрајните ефекти како собирањето и течењето на бетонот, кои имаат големо влијание врз севкупното однесување на армиранобетонските конструкции [4].

Неколку параметри имаат големо влијание на зголемувањето на отворот на пукнатината и деформациите на армиранобетонските елементи под дејство на долготрајни товари и тоа: нивото на оптоварување, процентот на армирање, распоредот на арматурата во попречен пресек како и нејзиниот дијаметар, јакосните карактеристики на бетонот, состојбата на пукнатините при нанесување на истиот и др [5].

Во овој труд се прикажани добиените резултати од реализираната експерименталната програма во која е следен развојот, формирањето и отворот на пукнатините во период од една година кај армиранобетонски елементи со реални димензии (15/28/300cm) изложени на долготрајни товари со различен интензитет. Исто така, трудот прикажува споредба помеѓу експериментално добиените и пресметаните отвори на пукнатини со примена на аналитичките модели дадени во Eurocode 2 [2] и Model Code 10 [3].

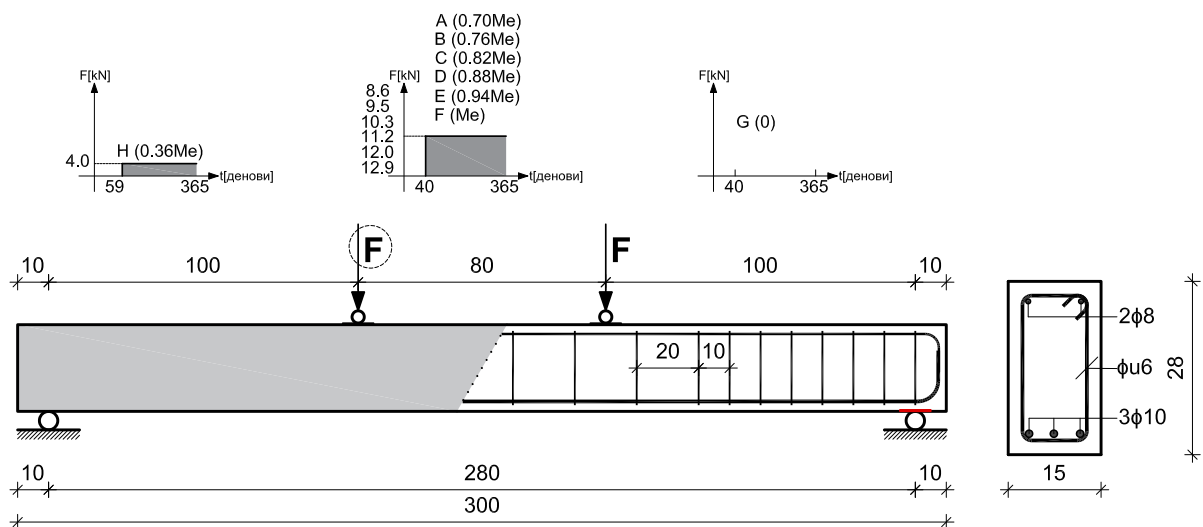
2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПРОГРАМА

Имајќи го предвид значењето на долготрајните дејства на бетонските конструкции, во изминатите години на Градежниот факултет во Скопје спроведени се експериментални истражувања кои вклучуваат различен тип на бетон, како и различен интензитет на товар и негово времетраење [6,7,8,9].

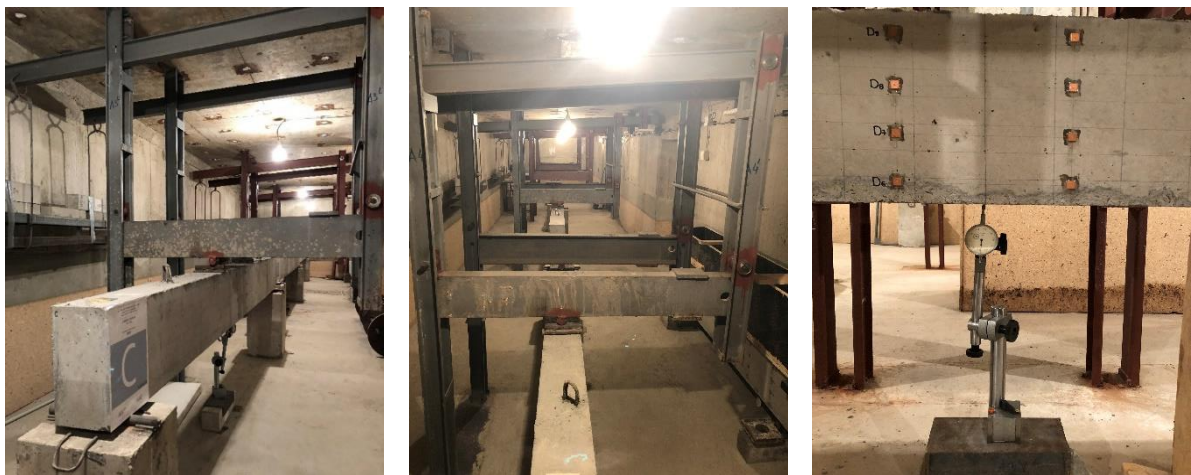
Со цел да се утврди влијанието на долготрајните постојани товари во тек на време врз граничната состојба на пукнатини, реализирана е експериментална програма во лабораторијата на факултетот, каде беа обезбедени релативно константни лабораториски услови (слика 2).

Експерименталната програма се состои во изработка и следење на осум пробни елементи – армиранобетонски прости греди, изработени од бетон класа C35/45, со правоаголен напречен пресек 15/28 cm и должина 300 cm, како и пробни тела со различен облик и димензии кои служат за определување на механичките и деформабилните својства на вградениот бетон. Избраните димензии на гредите овозможуваат употреба на реален бетон и арматура. Геометријата на гредите и вградената арматура се прикажани на слика 1 [10].

Товарени се седум од вкупно осум греди (A, B, C, D, E, F, G, H) со различен интензитет на товар, кој е аплициран врз гредата во вид на две концентрирани сили. Кај шест греди е нанесен постојан долготраен товар со интензитет при кој во разгледуваниот временски период се појавуваат пукнатини. Една греда не е товарена со цел да се следат дилатациите од собирање и евентуалните промени во амбиенталните услови во текот на истиот временски период на следење [10].



Сл. 1. Геометрија, арматура и шема на товарење на армиранобетонските греди за испитување



Сл. 2. Лабораториски простор

На старост од 40 дена, кога е нанесено и оптоварувањето на армиранобетонските греди, извршени се испитувања на пробните тела со цел да се утврдат својствата на бетонот и тоа: јакоста на притисок, јакоста на затегнување при свиткување и при цепање, модулот на еластичност, деформациите од собирањето и течењето. Резултатите од испитувањето се прикажани во табела 1.

Табела 1. Експериментално добиени вредности за механичките и деформабилните својства на бетонот за t=40 и t=365 дена

C35/45								
	$f_{ck,cube}$	f_{ck}	$f_{ct,f}$	$f_{ct,sp}$	E_c	ϵ_{cs}	ϵ_c	ϕ
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	
t=40	48.27	40.82	6.82	3.84	34124	0.204	/	/
t=365	/	/	/	/	/	0.460	0.903	1.755

3. ПРЕСМЕТУВАЊЕ НА ПУКНАТИНИ ОД ДЕЈСТВО НА ДОЛГОТРАЈНИ ТОВАРИ

Пукнатините во армиранобетонските конструкции се типичен феномен што се случува во одредени попречни пресеци каде напрегањето на затегнување ја достигнува јакоста на затегнување на бетонот. Таквото напрегање може да биде резултат на ограничување предизвикано од волуменските промени на конструкцијата или дејство на товари во експлоатација [11]. Во овој труд ќе бидат разгледувани само пукнатините кои се појавуваат како резултат на дејството на товари.

Аналитичките модели за предвидување на пукнатините кои што се користат во актуелните денешни прописи, отворот на пукнатините го определуваат со интегрирање на вистинските дилатации на ниво на арматурата на потегот помеѓу две пукнатини. Тие како решение даваат отвор на само една единствена пукнатина, а тоа е максималниот отвор на пукнатина во Eurocode-2 [2] или карактеристичниот отвор на пукнатина во fib Model Code 2010 [3]. Пресметаниот карактеристичен (максимален) отвор на пукнатина е доволен податок само за докажување на трајноста на елементот. Но, на ваков начин не може да се добие реална слика за развојот, ориентацијата и местоположбата на пукнатините по должина на елементот.

3.1. Пресметка на пукнатини според EN 1992-1-1 Eurocode 2 (EC2)

Ако се претпостави дека целото издолжување кое што се појавува при формирање на пукнатината е сместено во таа пукнатина, тогаш откако сите пукнатини ќе се формираат отворот на пукнатината може да биде даден со следнава зависност, изведена од условот за компатибилност на дилатациите помеѓу бетонот и арматурата [12]:

$$w = S_{rm} \epsilon_m \quad (1)$$

каде: w - отвор на пукнатина, S_{rm} - средно растојание меѓу пукнатини и ϵ_m - средна дилатација.

Ако во пресметките се бара максималниот отвор на пукнатина, наместо средниот, тој може да се определи според изразот:

$$w_k = S_{r,max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (2)$$

Средната дилатација не е само дилатација во арматурата, туку во поточните пресметки се зема во предвид и ефектот на зголемената крутост на затегнување на арматурата ϵ_{sm} , намалена за средната дилатација во бетонот на површината од елементот ϵ_{cm} . Истата може да се определи од изразот:

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (3)$$

каде: σ_s - напрегање во затегнатата арматура пресметано земајќи напукнат пресек, α_e - однос на модулите на еластичност на бетонот и арматурата (E_s/E_c), $\rho_{p,eff} = A_s/A_{c,eff}$ и k_t - коефициент кој зависи од времетраењето на товарот (0.6 за краткотрајни товари и 0.4 за долготрајни товари).

При проектирање, не се бара средниот отвор на пукнатина туку вредност која што нема да биде надмината. Eurocode 2 [2,12] го користи карактеристичниот отвор на пукнатина, што е дефиниран како отвор со 5% можност за пречекорување. Со експериментални истражувања

добиено е дека најразумна проценка на карактеристичниот отвор е добиена ако максималното растојание меѓу пукнатините се зголеми за 1.7 пати од средната вредност. Во Eurocode 2 [2,12] максималното растојание помеѓу пукнатините во елементи во кои главната арматура е распоредена на меѓусебно растојание $\leq 5(c+\phi/2)$ се пресметува според изразот:

$$S_{r,max} = 3.4c + 0.425k_1k_2\phi/\rho_{eff} \quad (4)$$

каде: ϕ – дијаметар на арматурна прачка, c – заштитен бетонски слој, k_1 – коефициент кој ја зема во предвид адхезијата помеѓу бетонот и арматурата (0.8 за прачки со висока адхезија и 1.6 за глатки прачки), k_2 – коефициент кој го зема во предвид распоредот на дилатациите (0.5 за свиткување и 1 за чисто затегнување), $k_3=3.4$ и $k_4=0.425$.

3.2. Пресметка на пукнатини според СЕВ-FIB Model Code 2010 (MC10)

За сите фази на пукнатини (фаза на формирање на пукнатини и фаза на стабилизирани слика на пукнатини), пресметковниот отвор на пукнатина w_d може да се пресмета како:

$$w_d = 2l_{s,max}(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} - \epsilon_{cs}) \quad (5)$$

каде: $l_{s,max}$ - должина на која што се јавуваат напрегањата на прилепување и пролизгување на бетонот и арматурата (дилатациите во бетонот и арматурата на оваа должина го предизвикуваат отворот на пукнатината), ϵ_{sm} - средна дилатација во арматурата на должина $l_{s,max}$, ϵ_{cm} - средна дилатација во бетонот на должина $l_{s,max}$ и ϵ_{cs} - дилатација во бетонот заради собирање.

За должината $l_{s,max}$ е дадена следнава равенка:

$$l_{s,max} = kc + \frac{1}{4} \frac{f_{ctm} \cdot \phi_s}{\tau_{bms} \rho_{s,ef}} \quad (6)$$

каде: k - емпириски коефициент кој го зема во предвид влијанието на заштитниот бетонски слој ($k=1$), c - заштитен бетонски слој и τ_{bm} - средно напрегање на прилепување меѓу бетонот и арматурата (табела 2).

Средната дилатација може да се определи од изразот:

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} - \epsilon_{cs} = \frac{\sigma_s - \beta \sigma_{sr}}{E_s} - \eta_r \epsilon_{sh} \quad (7)$$

каде: σ_s - напрегање во арматура на место на пукнатина, σ_{sr} - максимално напрегање на арматура на место на пукнатина во фаза на формирање на пукнатини:

$$\sigma_{sr} = \frac{f_{ctm}}{\rho_{s,ef}} (1 + \alpha_e \rho_{s,ef}) \quad (8)$$

каде: $\rho_{s,ef}=A_s/A_{c,ef}$ - ефективен процент на армирање за затегната арматура, $A_{c,ef}$ - ефективна затегната површина на бетонот, $\alpha_e=E_s/E_c$ - однос на модулот на еластичност на арматурата и модулот на еластичност на бетонот, β - емпириски коефициент за да се определи средната дилатација на должина $l_{s,max}$ и зависи од типот на товарот (табела 2), η_r - коефициент кој го зема во предвид влијанието од собирање на бетонот и ϵ_{sh} - дилатација од собирање.

Вредноста за τ_{bm} и за коефициентите β и η_r можат да се преземат од табела 2.

Табела 2. Вредности за τ_{bm} , β и η_r за ребраста арматура

	Фаза на формирање на пукнатини	Фаза на стабилизација на пукнатини
Краткотрајни и инцидентни товари	$\tau_{bms} = 1.8f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.6, \eta_r = 0$	$\tau_{bms} = 1.8f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.6, \eta_r = 0$
Долготрајни и циклични товари	$\tau_{bms} = 1.35f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.6, \eta_r = 0$	$\tau_{bms} = 1.8f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.4, \eta_r = 1$

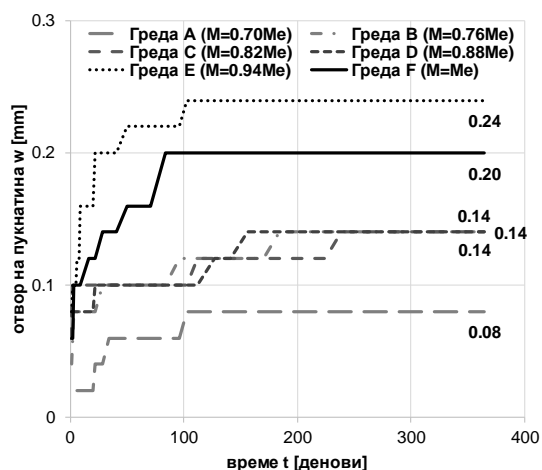
4. АНАЛИЗА НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Влијанието од долготрајното дејство на товарот врз развојот и формирањето на пукнатините кај елементите е утврдено преку следење на однесувањето на пробните греди во временски период од 365 дена. Сите греди се товарени со долготраен постојан товар, но со различен интензитет.

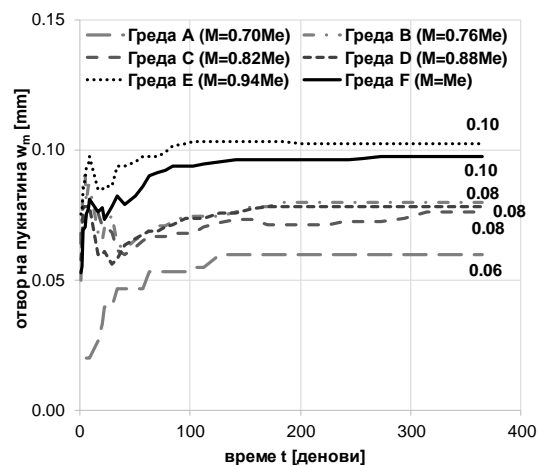
Од извршените експериментални испитувања добиени се резултати за распоредот, отворот и развојот на пукнатините по висина на елементот. Кај гредите В, С, D, Е, F пукнатини се појавија уште при нанесување на товарот ($t=40$ дена), додека пак кај гредата А пукнатини се појавија малку подоцна, односно после 6 дена од денот на товарење. Кај гредата Н не се појавија пукнатини во текот за целиот период на следење.

Развојот на отворот на пукнатините во тек на време е прикажан преку дијаграмот отвор на пукнатина-време на слика 3 и тоа под (а) прикажан е максималниот отвор на пукнатина, додека под (б) средниот отвор на пукнатина, додека пак на слика 4 е прикажана зависноста сила-отвор на пукнатина. Вредностите за крајниот максимален/среден отвор на пукнатината (w_t/w_{mt}) и максималниот/средниот отвор во моментот на нанесување на товарот (w_0/w_{m0}), како и прирастот на пукнатината во тек на време ($\Delta w_t/\Delta w_{mt}$) се прикажани во табела 3.

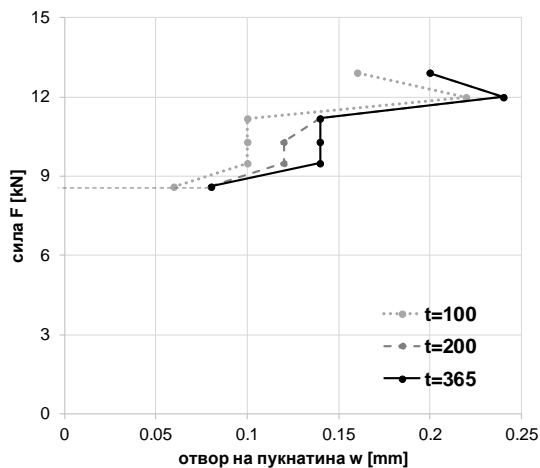
На слика 5 и 6 прикажан е распоредот на пукнатините за гредите со најмал и најголем товар и тоа горе распоредот во моментот на товарење, додека долу крајниот распоред кога веќе има стабилизирани слика на пукнатини. Со сива боја прикажани се пукнатините кои се појавуваат подоцна, при што дадено е и времето t (денови) пресметано од денот на товарење.



Сл. 3а. Развој на максималниот отвор на пукнатината во тек на време за сите греди



Сл. 3б. Развој на средниот отвор на пукнатината во тек на време за сите греди

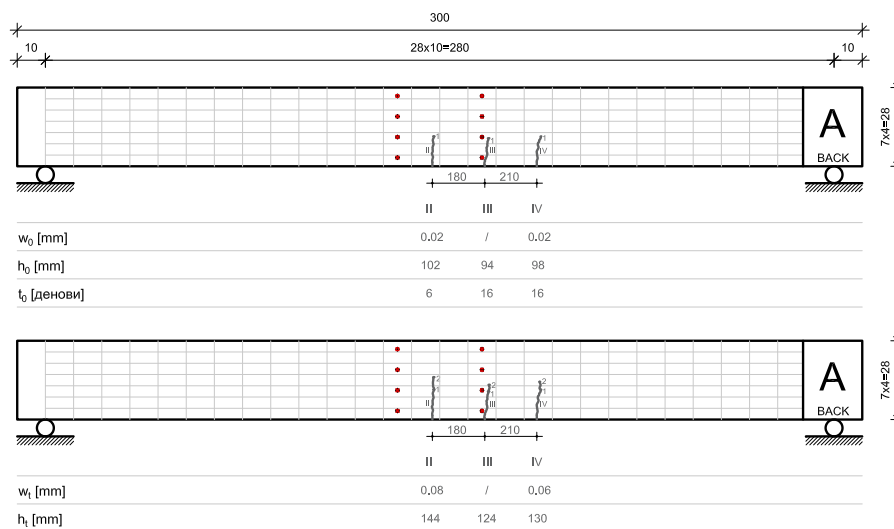


Сл. 4. Дијаграм: сила-отвор на пукнатина

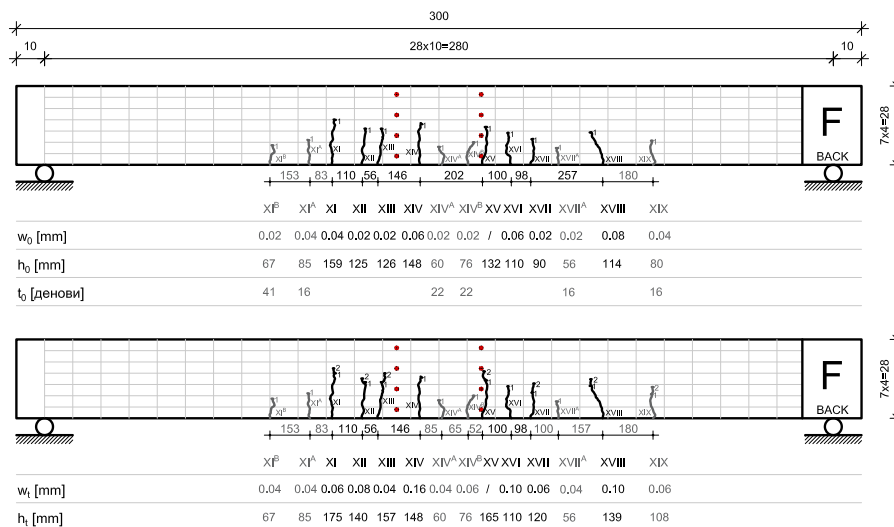
Табела 3. Измерени вредности за максималниот отвор на пукнатината при t=40 и t=365 дена

Греда		A	B	C	D	E	F
максимален отвор	w ₀ [mm]	/	0.06	0.08	0.08	0.08	0.10
	w _t [mm]	0.08	0.14	0.14	0.14	0.24	0.20
	Δw _t [mm]	/	0.08	0.06	0.06	0.16	0.10
среден отвор	w _{m0} [mm]	/	0.05	0.06	0.06	0.08	0.05
	w _{mt} [mm]	0.06	0.08	0.08	0.08	0.10	0.10
	Δw _{mt} [mm]	/	0.03	0.02	0.02	0.02	0.05

Може да се забележи дека пукнатините во средната третина на распонот се вертикални и нивната висина се зголемува во тек на време, додека во крајните третини се закосени кон средината со помал пораст на висината. Ова се должи на влијанието на моментот на свиткување, кое се намалува движејќи се кон потпорите, како и трансверзалната сила.



Сл. 5. Распоред на пукнатините по должина на гредата A(0.7Me) при старост од t=40 дена (горе) и t=365 дена (долу)



Сл. 6. Распоред на пукнатините по должина на гредата F(Me) при старост од t=40 дена (горе) и t=365 дена (долу)

Во следната табела (табела 4) прикажано е максималното растојание меѓу пукнатините за секоја греда поодделно. Истото се намалува во тек на време поради тоа што се појавуваат нови пукнатини. Прикажан е односот меѓу крајното максимално растојание и моментално измереното при нанесување на товарот.

Табела 4. Измерени вредности за растојанието меѓу пукнатини при $t=40$ дена и $t=365$ дена

Греда		A	B	C	D	E	F
$S_{\max(t=40)}$	[mm]	/	242	240	208	275	202
$S_{\max(t=365)}$	[mm]	210	242	135	110	182	85
$S_{\max(t=365)}/S_{\max(t=40)}$	/	/	1	0.56	0.53	0.66	0.42

5. СПОРЕДБА ПОМЕЃУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ И АНАЛИТИЧКИ ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Направена е споредба на отворот на пукнатините добиен аналитички користејќи го методот даден во Eurocode 2 [2] и fib Model Code 2010 [3] и оние добиени експериментално. Анализираниот е максималниот отвор на пукнатина.

Моментот на појава на пукнатина, кој се користи при аналитичката пресметка на отворот на пукнатините е определен теоретски, бидејќи на армиранобетонските греди одеднаш е нанесен вкупниот товар. За определување на истиот користени се експериментално определените материјални и деформабилни карактеристики, при што изнесува $M_{cr}=9.32\text{kNm}$.

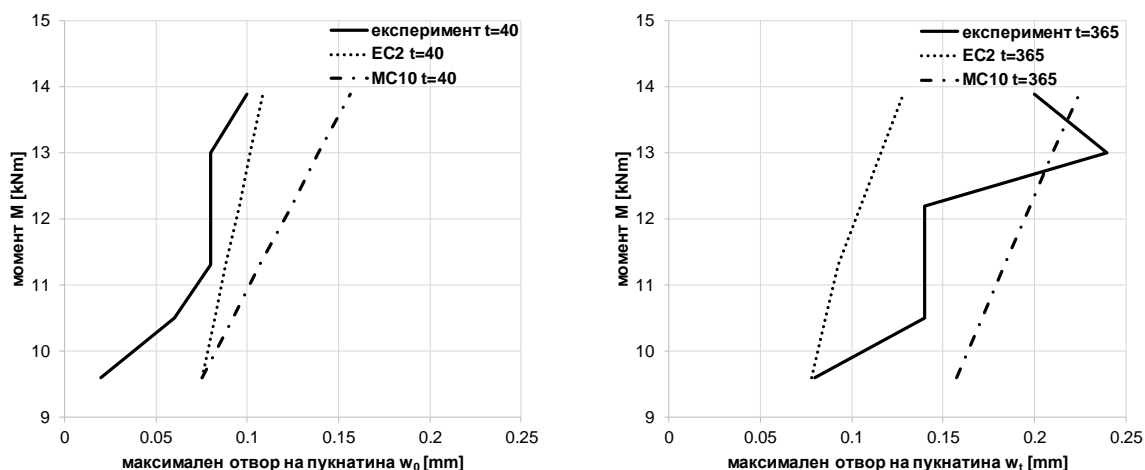
Во табела 5 даден е максималниот отвор на пукнатина за сите греди кај кои се следени, односно во време $t=40$ и $t=365$ дена. Треба да се напомене дека точно определување на отворот на пукнатините не е возможно, така што можно е да се појават релативно големи отстапувања на резултатите.

Табела 5. Споредба на максимален отвор на пукнатина измерен во експериментот и максимален отвор добиен со аналитичките модели (EC2 и MC10)

Греда	Момент M [kNm]	w – максимален отвор на пукнатина [mm]					
		Експеримент		EC2		MC10	
		t=40	t=365	t=40	t=365	t=40	t=365
A	9.6	0.02	0.08	0.08	0.08	0.08	0.16
B	10.5	0.06	0.14	0.08	0.09	0.09	0.17
C	11.3	0.08	0.14	0.09	0.09	0.11	0.18
D	12.2	0.08	0.14	0.10	0.11	0.12	0.20
E	13.0	0.08	0.24	0.10	0.12	0.14	0.21
F	13.9	0.10	0.20	0.11	0.13	0.16	0.22

Зависноста помеѓу максималниот отвор на пукнатината во моментот на товарење (w_0) и крајниот отвор на пукнатина (w_t) и моментот на свиткување (M) е даден на слика 7.

Пресметаните вредности за отворот на пукнатината, со користење на аналитичките модели за негово прогнозирање се со прифатливо согласување во однос на експериментално измерените. Иако за очекување е кај повеќе товарените греди да има поголем развој на отворот на пукнатината, тоа не е случај кај гредите E и F поради покасното појавување на нови пукнатини во тек на време, кое влијае и на конечниот развој на отворот на пукнатината на веќе појавените пукнатини.



Сл. 7. Влијание на моментот на свиткување врз моменталниот (лево) и конечниот (десно) максимален отвор на пукнатина

6. ЗАКЛУЧОЦИ

Од извршените експериментални истражувања на армиранобетонските елементи изложени на дејство на долготраен постојан товар со различен интензитет и направената анализа со примена на аналитичките модели може да се издвојат следните заклучоци:

- Интензитетот на постојаниот товар има влијание врз однесувањето на армиранобетонските елементи во тек на време.
- Долготрајните дејства во бетонот резултираат и со промена на должината и отворот на пукнатините, како и со појава на нови во тек на време.
- Промените кои настануваат од долготрајните дејства се изразено поинтензивни во периодот непосредно по нанесување на товарот.
- Кај повеќето пукнатини во првите 30 дена од нанесувањето на товарот се остварува 55 до 65% од отворот измерен на старост од 365 дена.
- Разгледуваните аналитички модели предложени во актуелните стандарди со задоволителна точност можат да ги прогнозираат граничните состојби на пукнатини на армиранобетонските елементи изложени на дејство на постојан долготраен товар.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gilbert R.I. and Ranzi G. (2011). Time – Dependent Behavior of Concrete Structures. Spon Press, Taylor and Francis Group, New York
- [2] EN 1992-1-1: Design of concrete structures, Eurocode – 2
- [3] CEB – FIP Model Code 2010 – MC10
- [4] Gilbert R.I. and Castel A. (2014). Influence of time-dependent effects on the crack spacing in reinforced concrete beams. Structural Concrete, Vol.15, No.3, pp 373-379
- [5] CEB Bulletin d'information No 235 (1997), Serviceability models: behavior and modelling in serviceability limit states including repeated and sustained loads, Lausanne
- [6] Markovski G., Arangjelovski T., Nakov D., Mark P. (2013). Determination of the coefficient ψ_2 to define long-term effects on concrete elements under variable load. DAfStb Jahrestagung 2013, Bochum, Germany
- [7] Arangjelovski T., Markovski G., Mark P. (2014). Influence of repeated variable load on long-term behavior of concrete elements. Journal of Civil Engineering and Architecture, Vol 8, No 3, pp.302-314

- [8] Nakov D., Markovski G., Arangjelovski T., Mark P. (2018). Experimental and analytical analysis of creep of steel fibre reinforced concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Vol. 62, No 1, pp.226-231
- [9] Docevska M., Arangjelovski T., Markovski G. and Nakov D. (2018). Numerical and analytical model for serviceability limit states of RC elements. *Gradevinar*, Vol 70, No 11, pp.943-952
- [10] Stojkoska E. (2019), Long term behaviour of reinforced concrete elements subjected to different intensity of sustained load. Master thesis. Faculty of Civil Engineering, University “Ss. Cyril and Methodius”, Skopje, Republic of North Macedonia
- [11] Allam S.M., Shoukry M.S., Rashad G.E. and Hassan A.S. (2012) Crack width evaluation for flexural RC members. *Alexandria Engineering Journal*, Vol.51, No.3, pp 211-220
- [12] Beeby A.W. and Narayanan R.S. (2005). *Designers` guide to Eurocode – 2: Design of concrete structures*. Thomas Teford, London
- [13] Alam S.Y., Lenormand T., Loukili A. and Regoin J.P. (2010) Measuring crack width and spacing in reinforced concrete members. 7th International conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Jeju, North Korea, pp 377-382
- [14] Ghali A., Favre R. and Eldbadry M. (2002). *Concrete Structures (Stresses and Deformation – Third Edition)*. Spon Press, London and New York
- [15] Gilbert R.I. (2011). The Serviceability Limit States in Reinforced Concrete Design. *Procedia Engineering*, Vol.14, pp 385-395