

ISSN 2217-8139 (Print)
ISSN 2334-0229 (Online)

UDK: 06.055.2:62-03+620.1+624.001.5(497.1)=861



2015.
GODINA
LVIII



GRAĐEVINSKI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

2

BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
JOURNAL FOR RESEARCH OF MATERIALS AND STRUCTURES



DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE
SOCIETY FOR MATERIALS AND STRUCTURES TESTING OF SERBIA

GRAĐEVINSKI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
JOURNAL FOR RESEARCH IN THE FIELD OF MATERIALS AND STRUCTURES

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Professor **Radomir Folić**, Editor in-Chief
Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Serbia
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
e-mail: folic@uns.ac.rs

Professor **Mirjana Malešev**, Deputy editor
Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad,
Serbia - Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom
Sadu, Srbija, e-mail: miram@uns.ac.rs

Dr **Ksenija Janković**
Institute for Testing Materials, Belgrade, Serbia
Institut za ispitivanje materijala, Beograd, Srbija

Dr **Jose Adam, ICITECH**
Department of Construction Engineering, Valencia,
Spain.

Professor **Radu Banchila**
Dep. of Civil Eng. „Politehnica“ University of
Temesoara, Romania

Professor **Dubravka Bjegović**
University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering,
Department of Materials, Zagreb, Croatia

Assoc. professor **Meri Cvetkovska**
Faculty of Civil Eng. University "St Kiril and Metodij",
Skopje, Macedonia

Professor **Michael Forde**
University of Edinburgh, Dep. of Environmental Eng.
UK

Dr **Vladimir Gocevski**
Hydro-Quebec, Montreal, Canada

Acad. Professor **Yachko Ivanov**
Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

Dr. Habil. **Miklos M. Ivanyi**
UVATERV, Budapest, Hungary

Professor **Asterios Liolios**
Democritus University of Thrace, Faculty of Civil
Eng., Greece

Professor **Doncho Partov**
University of Construction and Architecture - VSU
"LJ.Karavelov" Sofia, Bulgaria

Predrag Popović
Wiss, Janney, Elstner Associates, Northbrook,
Illinois, USA.

Professor **Tom Schanz**
Ruhr University of Bochum, Germany

Professor **Valeriu Stoin**
Dep. of Civil Eng. „Poloitehnica“ University of
Temesoara, Romania

Acad. Professor **Miha Tomažević**, SNB and CEI,
Slovenian Academy of Sciences and Arts,

Professor **Mihailo Trifunac**, Civil Eng.
Department University of Southern California, Los
Angeles, USA

Lektori za srpski jezik: Dr **Miloš Zubac**, profesor

Aleksandra Borojev, profesor

Proofreader: Prof. **Jelisaveta Šafranj**, Ph D

Technical editor: Stoja Todorovic, e-mail: saska@imk.grf.bg.ac.rs

PUBLISHER

Society for Materials and Structures Testing of Serbia, 11000 Belgrade, Kneza Milosa 9
Telephone: 381 11/3242-589; e-mail: dimk@ptt.rs, veb sajt: www.dimk.rs

REVIEWERS: All papers were reviewed

KORICE: Budva, 1979: rušenje zidova od opeke na smicanje

COVER: Budva, 1979: Brick wall failure due to shear

Financial supports: Ministry of Scientific and Technological Development of the Republic of Serbia

DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE
SOCIETY FOR MATERIALS AND STRUCTURES TESTING OF SERBIA

GRAĐEVINSKI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
JOURNAL FOR RESEARCH IN THE FIELD OF MATERIALS AND STRUCTURES

SADRŽAJ

Miloš ČOKIĆ Predrag PETRONIJEVIĆ Marija S. TODOROVIĆ Nenad PEČIĆ ANALIZA VEZANE ENERGIJE I EMISIJE CO ₂ ZA IZVOĐENJE MOSTOVSKJE KONSTRUKCIJE SA STANOVIŠTA ODRŽIVOSTI Originalni naučni rad	3
Željka RADOVANOVIĆ Sretena DIMOVSKI Ilija LALOŠEVIĆ OJAČANJE FRMC KOMPOZITIMA ZIDANIH ZIDOVA OD BLOK OPEKE Originalni naučni rad	21
Dragan KOSTIĆ Vuk MILOŠEVIĆ ANALIZA STABILNOSTI NEKIH IZVEDENIH KABLOVSKIH REŠETAKA Stručni rad	39
Radimir FOLIĆ Danijel KUKARAS In MEMORIAM prof. dr LJUBOMIR VLAJIĆ (1941-2015)	59
Uputstvo autorima	61

CONTENTS

Milos ČOKIC Predrag PETRONIJEVIC Marija S. TODOROVIC Nenad PEČIC ANALYSIS OF THE EMBODIED ENERGY AND THE CO ₂ EMISSION IN CONSTRUCTION PROCESS OF A BRIDGE STRUCTURE FROM THE ASPECT OF SUSTAINABILITY Original scientific paper	3
Zeljka RADOVANOVIC Sretena DIMOVSKI Ilija LALOSEVIC STRENGTHENING MASONRY WALLS MADE OF BRICK BLOCKS WITH FRMC COMPOSITES Original scientific paper	21
Dragan KOSTIC Vuk MILOSEVIC STABILITY ANALYSIS OF SOME CONSTRUCTED CABLE TRUSSES Professional paper	39
Radimir FOLIC Danijel KUKARAS In MEMORIAM prof. dr LJUBOMIR VLAJIC (1941-2015)	59
Preview report	61

CIP - Каталогизacija u publikaciji
Narodna biblioteka Srbije, Beograd

620.1

GRAĐEVINSKI materijali i konstrukcije :
časopis za istraživanja u oblasti materijala
i konstrukcija = Building Materials and
Structures : journal for research of
materials and structures / editor-in-chief
Radimir Folić. - God. 54, br. 1 (2011)-
- Beograd (Kneza Miloša 9) : Društvo za
ispitivanje i istraživanje materijala i
konstrukcija Srbije, 2011- (Novi Beograd :
Hektor print). - 30 cm

Tromesečno. - Je nastavak: Materijali i
konstrukcije = ISSN 0543-0798
ISSN 2217-8139 = Građevinski materijali i
konstrukcije
COBISS.SR-ID 188695820



ANALIZA VEZANE ENERGIJE I EMISIJE CO₂ PRI IZVOĐENJU MOSTOVSKJE KONSTRUKCIJE SA STANOVIŠTA ODRŽIVOSTI

ANALYSIS OF THE EMBODIED ENERGY AND THE CO₂ EMISSION IN CONSTRUCTION PROCESS OF A BRIDGE STRUCTURE FROM THE ASPECT OF SUSTAINABILITY

Miloš ČOKIĆ
Predrag PETRONIJEVIĆ
Marija S. TODOROVIĆ
Nenad PEČIĆ

ORIGINALNI NAUČNI RAD
ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER
UDK: 624.21.016
doi:10.5937/grmk1502003C

1 UVOD

U radu se razmatra uticaj različitih konstruktivnih rešenja mostovskih konstrukcija na potrebnu primarnu energiju za proizvodnju materijala i elemenata konstrukcije i pri izvođenju konstrukcije. Takođe, analizira se uticaj ovih procesa na životnu sredinu određivanjem odgovarajuće emisije CO₂.

Kao ključni strukturni element u saobraćajnoj mreži, mostovska infrastruktura ne koristi samo brojne prirodne resurse i energiju, već ima i dug životni vek, odnosno upotrební ciklus, što rezultuje i velikom zabrinutošću povodom uticaja konstrukcije na životnu sredinu. Međutim, aktuelni proces donošenja odluka i dalje se uglavnom bazira na tehničkom, sigurnosnom i ekonomskom aspektu, gde procena uticaja izgradnje i eksploatacije konstrukcije na životnu sredinu još nije integrisana u čitav proces. Iz perspektive zaštite životne sredine, odluke donesene danas mogu imati dugoročan efekat tokom kompletnog životnog veka mosta [1].

U radu su prikazani rezultati proračuna vezane energije i emisije CO₂ za tri rešenja mosta na istoj lokaciji, različitih konstruktivnih sistema. Na osnovu lokacije

1 INTRODUCTION

This paper considers the influence of different structural solutions of bridge constructions on the amount of primary energy as part of the production process of construction materials and structural elements, as well as part of construction building process. It also analyzes the impact of these processes on the environment in the form of CO₂ emission.

“As the fundamental structures in the transportation network, the bridge infrastructure not only consumes numerous natural resources and energy, but also have long-term life span, which results into significant concerns of the environmental impact. However, the current decision making process is still mainly focused on the technique, safety and economic perspectives, that the environmental assessment is not yet integrated. From the environmental perspective, the decisions made today may have a long-term effect for the whole life cycle of bridge” [1].

The calculation results of the amount of embodied energy and CO₂ emission for three different structural solutions of bridge construction are presented in the

Miloš Čokić, master inž. građ.
Doc. dr Predrag Petronijević, dipl.inž.građ, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet
Prof. dr Marija S. Todorović, dipl. maš. inž, urednik Elsevier's Energy & Buildings Journal-a, Član AINS-a, Fellow-(ASHRAE, REHVA, WAAS), Research Prof. Kyung Hee University, Seoul, Korea, Guest Prof. Southeast University, Nanjing, China
Doc. dr Nenad Pečić, dipl.inž.građ, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

Miloš Čokić, MSc Civ. Eng.
Docent Predrag Petronijević, PhD Civ. Eng, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering
Prof. Marija S. Todorović, PhD, Editor of Elsevier's Energy & Buildings Journal, Member of AINS-a, Fellow-(ASHRAE, REHVA, WAAS), Research Prof. Kyung Hee University, Seoul, Korea, Guest Prof. Southeast University, Nanjing, China
Docent Nenad Pečić, PhD Civ. Eng, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

mosta, karakteristika terena i projektnih zahteva, odabrana su tri sledeća konstruktivna rešenja glavnog nosećeg sistema:

- 1) **Niz prostih greda;**
- 2) **Kontinualna greda;**
- 3) **Ramovski sistem.**

Kolings (Collings [2006]) izvršio je poređenje formi mostovskih konstrukcija iz ugla uticaja na životnu sredinu, na osnovu kojih su dobijeni neki pokazatelji o vezanoj energiji i emisiji CO₂ kod mostova, pod pretpostavkom da su ovo racionalni pokazatelji uticaja konstrukcije na životnu sredinu. Glavni rezultati iz ovog poređenja navode nas na sledeće zaključke:

– Teret uticaja na životnu sredinu tokom izgradnje mosta je približno proporcionalan ceni konstrukcije, što je uglavnom jednako količini materijala utrošenog za izgradnju mostovske konstrukcije. Što je veći raspon konstrukcije, potrebno je utrošiti i više materijala, i na taj način se povećava teret uticaja na životnu sredinu. Upotreba materijala s manjom količinom vezane energije i ugljen-dioksida veoma je korisna. U poređenju s većinom mostovskih konstruktivnih tipova, betonski mostovi imaju manju količinu vezane energije i emisije CO₂. Iako betonski mostovi sadrže cement, koji ima visoku količinu vezane energije, to se može ublažiti zamenom dela cementa suplementima.

– U toku eksploatacije konstrukcije, postoji konstantan uticaj na životnu sredinu tokom održavanja konstrukcije. Ovaj efekat povećava se kada se u obzir uzme i preusmeravanje saobraćaja.

– Za mostove srednjih raspona, količina emisije CO₂ tokom životnog veka konstrukcije od popravki i održavanja može biti slična onim u fazi izgradnje.

Dobijeni rezultati ukazuju na to da bi održive mostovske konstrukcije trebalo da imaju za cilj da očuvaju prirodne resurse i minimiziraju količinu otpada, odnosno štetnog uticaja (potreban je efikasan, minimalistički dizajn, koji izbegava ekstravagantne arhitektonske poduhvate), da svedu na minimum „vezanu” energiju u konstrukciji (odgovarajućim odabirom materijala i izvora materijala za funkcionalne potrebe mosta) i da ostvare dug period eksploatacije, s minimalnim ulaganjima u održavanje konstrukcije (dug životni vek i upotreba kvalitetnih, izdržljivih materijala)[2].

Radom je obuhvaćena analiza uslovljenosti energetskog utroška i emisije CO₂ projektnim rešenjima i načinima izvođenja konstrukcije, za tri prethodno napregnuta armiranobetonska drumska mosta.

Dobijeni rezultati treba da pokažu mogućnost da se usvajanjem određenog rešenja konstrukcije može direktno uticati na količinu utrošenog materijala i vezane energije konstrukcije, pa samim tim – i na emisiju CO₂.

2 OPIS PROJEKTNIH REŠENJA

Profil terena korišćen za projektovanje konstrukcije i načina izvođenja svakog od tri mosta predstavljen je na *Slici 1*. Potrebno je premostiti rečno korito, saobraćajnicu i obostrani pad terena, sa zadatom kotom nivelete na visini od 14,00 m. Projektni maksimalni nivo vode iznosi 2,90 m. Takođe, predviđena je i saobraćajnica s profilom širine 10,00 i visine 5,00 m. Lokacija je u okolini

paper. The constructions are located on the same site. Based on the location, terrain characteristics and project requirements, the following three design solutions have been chosen for the main support system:

- 1) **Series of simple beams;**
- 2) **Continuous beam;**
- 3) **Frame.**

“Collings (2006) has performed an environmental comparison of bridge forms that provides some indication of embodied energy and CO₂ emissions in bridges, assuming these are a reasonable measure of the environmental burden of the structure. The major findings from that comparison suggest:

– The environmental burden during the construction of a bridge is approximately proportional to its cost, which in turn generally equates to the volume of materials consumed by the bridge. Larger spans use more material and have a higher burden. The use of materials with lower embodied energy and CO₂ are beneficial. For most bridge forms the concrete bridge has the lower embodied energy and CO₂ emission values. Whilst concrete bridges use cement that has a high embodied energy, this can be mitigated by the use of supplementary cementitious materials as partial cement replacement.

– There is an ongoing environmental burden during the maintenance of paintwork, bearings, joints etc., and a particular spike in that burden when resurfacing is undertaken. This is increased when traffic diversions are undertaken for.

– The CO₂ emissions during the life of the bridge from repair and maintenance can be similar to those of the construction phase, for bridges of moderate spans.

These findings suggest sustainable bridge construction should aim to conserve natural resources and minimize waste (be an efficient, minimalist design, avoiding extravagant architectural statements), minimize the embodied energy in the structure (appropriate selection of materials and material sources for the functional demands of the bridge), and have a long life with minimal maintenance input (long service life and durable materials)” [2].

The study includes the analysis of conditionality of embodied energy and CO₂ emission with design solutions and construction methods of three prestressed concrete road bridges.

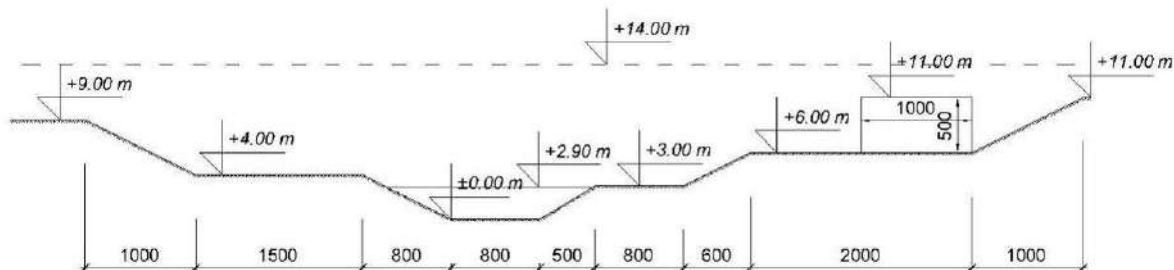
The obtained results show that, with the selection of a specific structural design, the quantity of used construction material, energy and CO₂ emission can be directly affected.

2 DESCRIPTION OF THE DESIGN SOLUTIONS

The terrain profile, on which the three bridge constructions should be located, is presented in *Figure 1*. The project demands bridging the river bed, road and double-sided slope of the terrain, with a given bridge grade at a height of 14.00 m. The projected water level maximum is 2.90 m, and the road profile with a width of

Beograda, a predviđeni vek trajanja konstrukcije 100 godina.

10.00 m and a height of 5.00 m. The location is in the vicinity of Belgrade, and the projected life cycle of the construction is 100 years.



Slika 1. Profil terena na lokaciji mosta
Figure 1. Terrain profile on the location of the bridge

Parametri zajednički za sva tri rešenja konstrukcije:

- Projekti su urađeni u skladu sa srpskim propisima i podacima dobijenim od Instituta IMS u Beogradu, [3], [4];
- Tip saobraćaja – drumski; II kategorija puta; dve trake širine po 3,50 m, dve pešačke staze širine 1,5 m;
- Objekti se izvode na tlu nosivosti – $\sigma_{Tla} = 300 \text{ kN/m}^2$;
- Konstrukcije su projektovane od marke betona MB40, sa upotrebom rebraste armature RA400/500;
- Kablovi za prethodno naprezanje su od užadi $\varnothing 15.2$, zatezne čvrstoće $f_{pk} = 1670 \text{ N/mm}^2$ i modula elastičnosti $E = 195 \text{ kN/mm}^2$
- Kolovoz je odvojen od pešačke staze betonskim ivičnjacima, dok se na krajevima pešačkih staza nalazi zaštitna ograda visine 1,40 m.

Specifičnosti pojedinačnih rešenja konstrukcije:

1) Niz prostih greda

Glavni nosač je prethodno napregnuta armirano-betonska konstrukcija, koja se sastoji od niza prostih greda jednakih raspona 21,2 m, s razmakom stubova od 22,0 m i ukupnom dužinom od 88,0 m (Slika 2).

Glavne elemente konstrukcije čini pet armirano-betonskih stubova sa svojim temeljima, prethodno napregnuti montažni glavni nosači, poprečni nosači, kolovozna ploča i montažni delovi pešačkih staza (Slika 3). Glavni nosači i delovi pešačkih staza su montažni, dok se ostali elementi liju na licu mesta.

Parameters common for all three structure solutions:

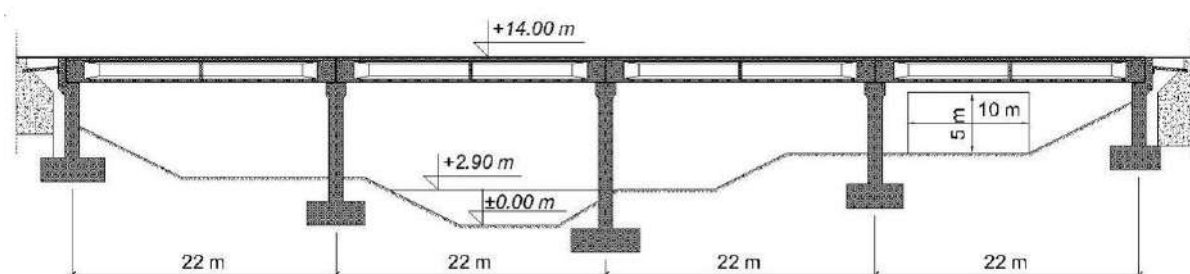
- The projects were developed in accordance with Serbian regulations and the data obtained from the IMS Institute in Belgrade, [3], [4];
- Traffic type – road traffic; II category; 2 lanes with 3.50 m width, 2 pedestrian paths with 1.5 m width;
- The objects are constructed on a soil with bearing capacity of $\sigma_{soil} = 300 \text{ kN / m}^2$
- The structures are constructed with the MB40 type of concrete, and with ribbed steel reinforcement bars type RA400/500;
- Prestressing cables are composed from $\varnothing 15.2$ type strands, with tensile strength $f_{pk} = 1670 \text{ N/mm}^2$ and elasticity modulus $E = 195 \text{ kN/mm}^2$
- Concrete curbs separate the road- and the pedestrian walkways; a protective fence with a height of 1.40 m is set at the end of the footpaths;

The specifics of the individual structural design solutions:

1) Series of simple beams

The main girder is a prestressed reinforced concrete structure, which consists of a series of simple beams of equal range of 21.2 m, with distance between the pillars of 22.0 m and an overall length of 88.0 m, Figure 2.

The main elements of the construction consist of five reinforced concrete pillars and their foundations, prestressed precast main girders, cross beams, road deck and prefabricated parts of pedestrian walkways, Figure 3.

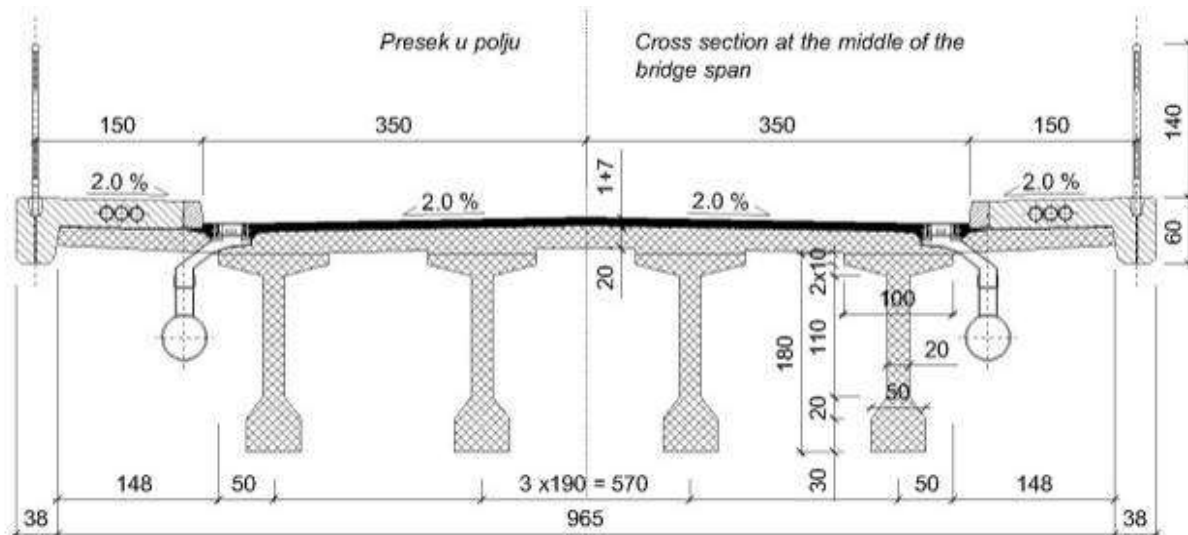


Slika 2. Poprečni presek mostovske konstrukcije – glavni nosač je niz prostih greda, (1)
Figure 2. Cross section of the bridge - main deck as a series of simple beams, (1)

Glavni nosač mosta u jednom rasponu čine četiri prethodno napregnuta montažna betonska nosača sistema proste grede, „I” poprečnog preseka i konstantne visine (Slika 3). Nosači su spregnuti kolovoznom pločom i poprečnim nosačima na krajevima i u sredini raspona.

The main girders and walkway parts are prefabricated, while the other elements are constructed in site.

The main bridge girder consists of 4 prestressed concrete girders in each span that are simple beam system girders, with "I" cross-section and constant height, Figure 3. The girders are joined with road deck and cross girders at the ends and in the middle of the spans.



Slika 3. Poprečni presek konstrukcije (niz prostih greda, [1])
Figure 3. Cross section of the construction (series of simple beams, [1])

2) Kontinualni nosač

Glavni nosač je prethodno napregnuta kontinualna greda, s rasponima 24,0 + 40,0 + 24,0 metara i ukupnom dužinom od, ponovo, 88,0 m (Slika 4).

Glavne elemente konstrukcije čine četiri armiranobetonska stuba sa svojim temeljima i prethodno napregnuta greda sandučastog poprečnog preseka konstantne visine, sa dijafragmama nad stubovima i u rasponima (Slika 4). Konstrukcija se lije na licu mesta, s montažnim delovima pešačkih staza.

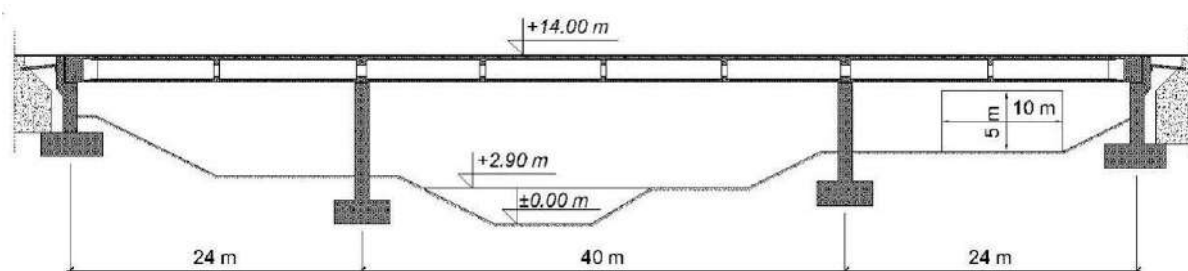
Glavni nosač je prethodno napregnut sa dvanaest kablova koji se pružaju celom dužinom nosača (Slika 10). Visina glavnog nosača je konstantna i iznosi 2,20 m.

2) Continuous beam

The main girder is a prestressed continuous beam with 24.0 + 40.0 + 24.0 m spans and a total length of, again, 88.0 m, Figure 4.

The main construction elements consist of 4 reinforced concrete pillars with their foundations and prestressed beam with box cross-section of constant height, and diaphragms over the pillars and at the middle of the spans, Figure 4. The construction is cast in situ, with mounting parts of walkways.

The main girder is prestressed with 12 cables which stretch throughout the entire girder, Figure 10. The height of the main girder is constant and it values 2.20 m.



Slika 4. Poprečni presek mostovske konstrukcije – glavni nosač je kontinualna greda (2)
Figure 4. Cross section of the bridge - main deck as a continuous beam, (2)

6" za proračun uticaja u elementima konstrukcija. Opterećenja za čije dejstvo je izvršena analiza:

- stalno opterećenje;
- saobraćajno opterećenje;
- seizmičko opterećenje;
- opterećenje vetrom;
- temperaturni uticaji.

Nakon proračuna sve tri konstrukcije, urađen je proračun količina materijala koji se ugrađuju u elemente konstrukcija.

Optimalni izbor građevinskih mašina ima veliki značaj za uspeh investicionih projekata u građevinarstvu. Izabrane mašine moraju zadovoljavati sva tehnološka ograničenja na projektu. Cilj izbora građevinskih mašina jeste pronaći kombinaciju koja, uz sve zadate uslove ograničenja, ima optimalne ekonomske parametre [5].

Mehanizacija se bira na osnovu predviđenog načina izvođenja svake od konstrukcija i u skladu s postizanjem optimalnih rezultata. Radovi na svakoj konstrukciji podeljeni su po pozicijama, u zavisnosti od operacije koja se izvodi:

- prethodni i pripremni radovi;
- zemljani radovi;
- betonski radovi;
- armirački radovi;
- prethodno naprezanje;
- završni radovi.

Na osnovu podataka dobijenih iz brošura proizvođača svake od mašina (tip motora, snaga mašine) i prema izračunatom broju radnih sati, pomoću pravilnika *Construction Equipment Ownership and Operating Expense Schedule* [6], izračunati su energetske troškovi svake od mašina za svaku od projektovanih konstrukcija.

made according to the principles of the First order theory (*linear theory of elasticity*) with the use of software package "Tower 6" for the calculation of load influences on the construction. Analyzed load cases are:

- permanent load,
- traffic load,
- seismic load,
- wind load,
- temperature influences.

After the needed structural calculations for three bridges, the amount of the required construction material was calculated.

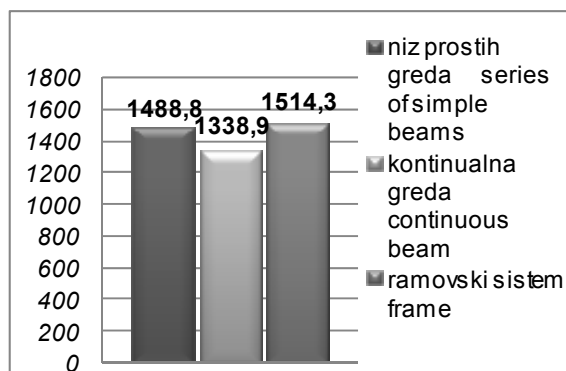
"The optimal choice of the construction machinery has a great importance for the success of investment projects in the construction industry. Selected machines must comply with all the technological constraints on the project. The objective of construction machinery selection is to find a combination that, with all the given limiting conditions, has optimal economic parameters" [5].

The selection of machinery is based on predicted method of construction of the each of structures, in accordance with achieving the optimal results. The works on each structure are divided per positions, depending on the type of operation:

- preliminary and preparatory works,
- terrain works,
- concrete works,
- steel reinforcement work,
- pre-stressing,
- finishing works.

Based on the data obtained from the manufacturer's brochure for each machine (engine type, engine power) and calculated number of working hours, the energy consumption of each machine during the work on each construction is calculated, according to the *"Construction Equipment Ownership and Operating Expense Schedule"* [6].

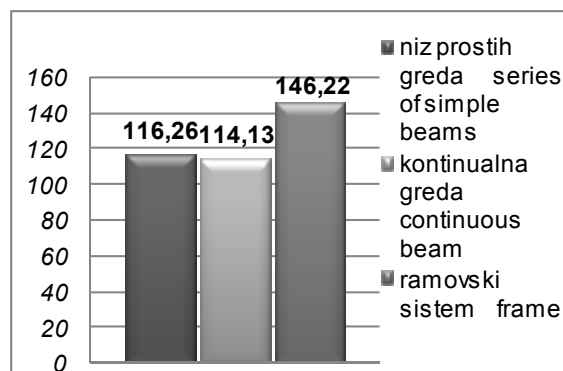
• Utrošak betona i armature



Grafik 1. Utrošak betona u zavisnosti od tipa konstrukcije

Chart 1. Quantity of concrete required, based on structure type

• Concrete and rebar requirement



Grafik 2. Utrošak armature u zavisnosti od tipa konstrukcije

Chart 2. Quantity of steel rebar required, based on structure type

Potrebne količine betona za svaku od tri konstrukcije slične su i razlikuju se za nekoliko procenata. Utrošak armature za prvu (1) i drugu (2) konstrukciju je sličan, dok je kod treće (3) dosta veći, što je posledica naprezanja usled temperaturnih uticaja.

The required amounts of concrete, for each of the three constructions, are very similar and differ by a few percent. Required amount of reinforcement bars for the first (1) and second (2) structure is similar, but a lot higher for the third (3), as a result of stress due to temperature effects.

• **Utrošak kablova za prethodno naprezanje**

• **Prestressing cables requirement**

Pregled kablova za prethodno naprezanje:

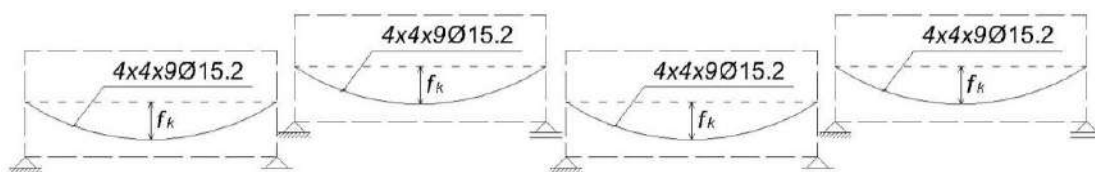
Overview of used prestressing cables:

Niz prostih greda:

Series of simple beams:

- Tip kablova: 9Ø15.2
- Broj kablova: 4 x 4 x 4 = 64
- Tip kotvi: S11/15
- Broj kotvi: 128

- Cables type: 9Ø15.2
- Number of cables: 4 x 4 x 4 = 64
- Anchors type: S11/15
- Number of anchors: 128



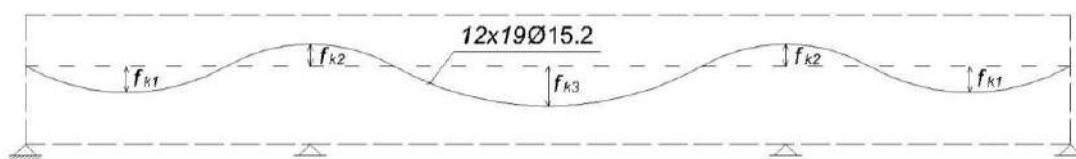
Slika 9. Trasa rezultatnih kablova, (1)
Figure 9. Prestressing cables resultant route, (1)

Kontinualni nosač:

Continuous beam:

- Tip kablova: 19Ø15.2
- Broj kablova: 12
- Tip kotvi: S19/15
- Broj kotvi: 24

- Cables type: 19Ø15.2
- Number of cables: 12
- Anchors type: S19/15
- Number of anchors: 24



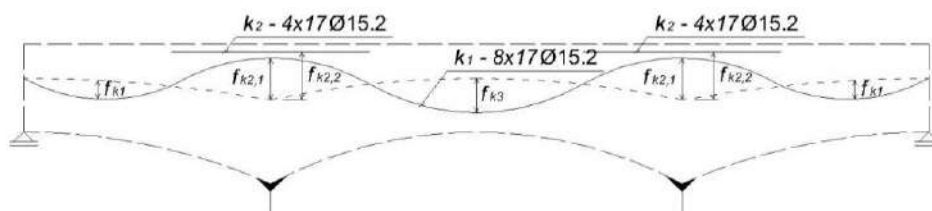
Slika 10. Trasa rezultatnih kablova, (2)
Figure 10. Prestressing cables resultant route, (2)

Ramovski sistem:

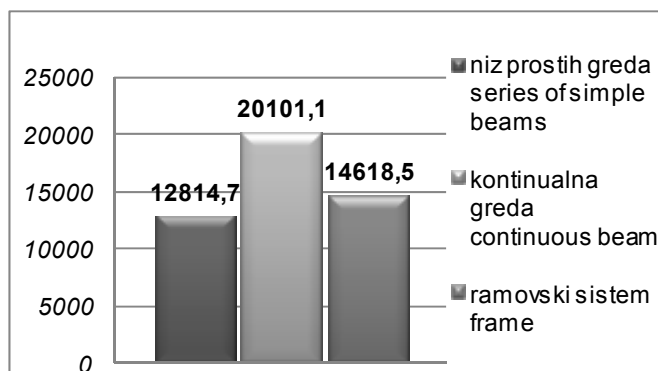
Frame:

- Tip kablova: 17Ø15.2
- Broj kablova: 8 + 2 x 4 = 20
- Tip kotvi: S19/15
- Broj kotvi: 16 + 2 x 8 = 32

- Cables type: 17Ø15.2
- Number of cables: 8 + 2 x 4 = 20
- Anchors type: S19/15
- Number of anchors: 16 + 2 x 8 = 32



Slika 11. Trasa rezultatnih kablova, (3)
Figure 11. Prestressing cables resultant route, (3)



Grafik 3. Ukupna dužina užadi za prethodno naprežanje
Chart 3. Total length of prestressing strands

Najveća ukupna dužina užadi u kablovima glavnog nosača je u drugoj konstrukciji (2), a zatim slede treća (3) i prva (1) – Grafik 3.

The maximum total length of the strands of the prestressing cables of the main girder is in the second structure (2), followed by the third (3) and then the first (1), Chart 3.

• **Utrošak kotvi i ležišta**

• **Requirement of prestressing anchors and bridge bearings**

Tabela 1. Utrošak kotvi i ležišta u zavisnosti od tipa konstrukcije
Table 1. Number and type of anchors and bearings depending on the type of construction

[komada] [number of items]	Niz prostih greda Series of simple beams	Kontinualni nosač Continuous beam	Ramovski sistem Frame
Kotve Prestressing anchors	128	24	32
Ležišta Bearings	32	8	4

U skladu sa usvojenim rešenjima triju konstrukcija, razlikuju se broj i tip potrebnih kotvi, kao i ležišta za glavne nosače (Tabela 1).

In accordance with adopted construction solutions for each structure, the quantity and type of anchors, as well as bearings for the main girders differ, Table 1.

4 ODABIR MEHANIZACIJE, PRORAČUN UČINAKA I RADNOG VREMENA MAŠINA, PRORAČUN UTROŠKA ENERGIJE

4 SELECTION OF THE MACHINERY, CALCULATION OF THE EFFECTIVENESS, WORK TIME OF THE MACHINERY AND EMBODIED ENERGY CALCULATION

• **Tip, model i operacija svake od mašina, koje učestvuju u izgradnji:**

• **Type, model, and the operation of each machine that participates in the construction:**

- dozer **CAT D6N** – skidanje humusa;
- utovarivač **CAT 953D** – utovar zemlje;
- vibro ploča **Wacker Neuson DPU4545He** – sabijanje tla;
- bager **CAT 329D L** –
- iskop, utovar i zatrpavanje;
- kiper **MERCEDES 2628** – transport;
- kamion **MAN TGS 41.480 8x4 BB** – transport;
- fabrika betona **LIEBHERR Mobilmix 2.25** – spravljanje betonske smese;
- auto mikser **LIEBHERR HTM 804** – transport betona;
- pumpa za beton **LIEBHERR 28 Z4 XT THP 125** – izlivanje betona;
- auto dizalica **LIEBHERR LTM 1040-2.1** – montaža glavnih nosača;

- dozer **CAT D6N** – removal of topsoil;
- loader **CAT 953D** – loading of soil;
- vibratory plate **Wacker Neuson DPU4545He** – soil compaction;
- hydraulic excavator **CAT 329D L** – excavation, loading and backfilling;
- dump truck **MERCEDES 2628** – transport;
- truck **MAN TGS 41.480 8x4 BB** – transport;
- mobile mixing plant **LIEBHERR Mobilmix 2.25** – preparation of concrete mixture;
- truck mixer **LIEBHERR HTM 804** – concrete transport;
- truck-mounted concrete pump **LIEBHERR 28 Z4 XT THP 125** – outpouring of concrete;
- mobile crane **LIEBHERR LTM 1040-2.1** –

- pervibrator **ENAR AX 48** – ugradnja betona;
- auto dizalica **MAEDA MC174 CRM** – držanje prese za prednaprezanje u zahtevanom položaju;
- presa i pumpa za prethodno naprezanje
 - **S - 180/PE - 180 S** – utezanje kablova;
 - presa i pumpa za prethodno naprezanje
 - **S - 310/PE - 300 S** – utezanje kablova;
- asfaltna baza **LINTEC CSD 2500** – spravljanje asfalta;
- finišeš **CAT AP500E** – razastiranje asfalta;
- teški valjak **BOMAG BW 203 AD-4** – zbijanje asfalta;
- srednje teški valjak **BOMAG BW 161 AD-4** – zatvaranje gornje površine asfalta i
 - laki valjak **BOMAG BW 151 AD-5** – peglanje gornje površine asfalta.

Za sva tri slučaja – (1), (2), (3) – usvojena su ista rastojanja od gradilišta do objekata za dopremanje potrebnog materijala, na osnovu čega su računati učinci mašina, radno vreme i utrošak energije.

Proračun radnog vremena izveden je iz potrebnih količina materijala za izgradnju svake konstrukcije, izabranih mašina i njihovih učinaka. Za proračun utroška energenata korišćeni su američki standardi – *Construction Equipment Ownership and Operating Expense Schedule* [6].

• Proračun vezane energije:

Vezana energija predstavlja ukupnu količinu energije, utrošenu u nekom proizvodnom procesu, odnosno ukupnu količinu energije ugrađene u finalni proizvod.

Ono što se može zaključiti iz proračuna jeste da se razlike u potrošnji energije koju koristi mehanizacija, pre svega, primećuju kod kamiona i kiperu, kao i automiksera, odnosno transportnih mašina, čija je potrošnja energije direktno uslovljena tipom motora, rastojanjem gradilišta od objekata odakle se doprema materijal, kao i količinom materijala koji se prevozi. Kako su parametri koji se odnose na karakteristike motora mašina, kao i udaljenost gradilišta od objekata iz kojih se prevozi materijal isti za sva tri slučaja, razlika u potrošnji energije direktno je uslovljena količinom transportovanog materijala. Pretpostavljene transportne dužine pojedinih stavki date su u *Tabeli 2*.

Potrošnja primarne energije po proizvedenoj toni armature u elekrolučnoj peći prikazana je na *Grafiku 4*. Ovaj podatak preuzet je iz publikacije *CO2 emissions of the Swedish steel industry*. [7]

Vrednosti energije utrošene pri proizvodnji betona i asfalta preuzete su iz dva izveštaja kanadskog Instituta Atina (*Athena Sustainable Materials Institute*). Preuzeti su rezultati energetskog utroška za proizvodnju betona čije karakteristike najviše odgovaraju karakteristikama betona marke MB 40 po SRPS-u, [8], *Grafik 4*. Za asfalt je korišćena vrednost utroška primarne energije za mešavinu bez udela recikliranog materijala, [9] – *Grafik 4*.

mounting of main girders;

- concrete vibrator **ENAR AX 48** – compaction of concrete;
- mini crane **MAEDA MC174 CRM** – holding the prestressing presses in the required position;
- the press and prestressing pump **S - 180/PE - 180S** – prestressing of cables;
- the press and prestressing pump **S - 310/PE - 300S** – prestressing of cables;
- asphalt mixing plant **LINTEC CSD 2500** – asphalt mixing;
- paver **CAT AP500E** – spreading of the asphalt;
- heavy roller **BOMAG BW 203 AD-4** – compaction of asphalt;
- medium roller **BOMAG BW 161 AD-4** – closing of the top surface of asphalt and
- light roller **BOMAG BW 151 AD-5** – ironing of the top surface of asphalt.

In all three cases (1), (2), (3), the same distance from the construction site to the materials supplying facilities have been adopted. On that basis – the effectiveness of the machines, their operating time and the energy consumption were calculated.

The calculation of the working time of the machinery has been derived from the required quantities of construction materials for each construction, selected machinery characteristics and their effectiveness. For the calculation of consumed energy American standards "*Construction Equipment Ownership and Operating Expense Schedule*" [6], were used.

• Calculation of the embodied energy:

Embodied energy represents a total amount of energy consumed in a production process, i.e. a total amount of energy embedded in a final product.

According to the calculations it can be concluded that the differences in energy consumption used by the machinery, are primarily noticed at trucks and dump trucks, and mobile-mixer, i.e. transport machinery. Their energy consumption is directly conditioned by the type of their engines, the distance between the construction site and materials supplying facilities, and the quantity of the materials being transported. Since the parameters related to the machinery engine characteristics, as well as the distance between construction site and the supplying objects are the same in all three cases, the difference in energy consumption is directly conditioned by the amount of transported material. Presumed transport lengths of particular processes are provided in *Table 2*

Consumption of primary energy per tone produced rebar in the electric arc furnace is shown in *Chart 4*. This data was taken from the publication "*CO₂ emissions of the Swedish steel industry*." [7]

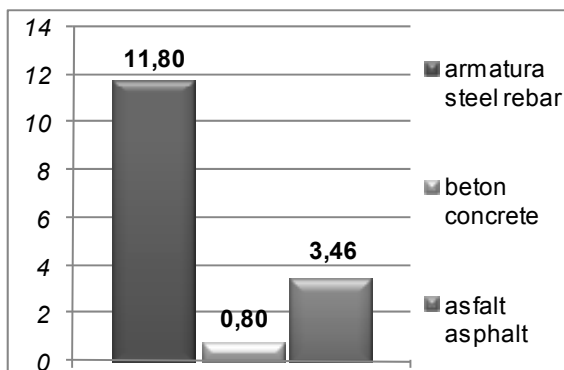
The values of the energy consumed for production of concrete and asphalt are taken from the two reports from the Canadian Athena Institute of (*Athena Sustainable Materials Institute*). Those values represent the energy, consumed in the production process of concrete whose characteristics correspond the most to the characteristics of concrete, MB 40 according to SRPS, [8] *Chart 4*. Also, a value of primary energy consumed for the production of asphalt mix without the share of recycled material was used, [9], *Chart 4*.

Tabela 2. Rastojanje između gradilišta i objekata za snabdevanje građevinskim materijalima i elementima konstrukcije
 Table 2. The distance between construction site and objects for supplying building materials and construction elements

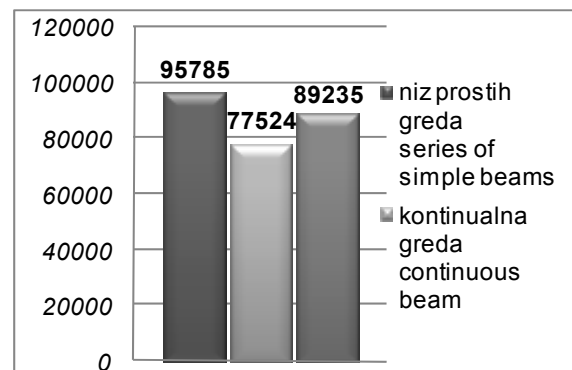
Lokacija objekta Lokation of object	Udaljenost od gradilišta Distance from the site [km]
Manevrisanje na gradilištu On site maneuvering	≈ 0.06
Armaturni pogon Rebar bending	10
Doprema kablova za prethodno naprezanje Prestressing cables shipping	25
Nabavka hidroizolacije Waterproofing delivery	7
Prefabrikacija betonskih ivičnjaka Prefabrication of concrete curbs	20
Nabavka bravarije Metalwork supply	17
Nabavka odvodnih cevi Drain pipes supply	12
Asfaltna baza Asphalt mixing plant	9

Tabela 3. Ukupan utrošak energenata za mehanizaciju
 Table 3. Total energy consumption of mechanization

Potrošnja energenata Energy consumption	Niz prostih greda Series of simple beams	Kontinualni nosač Continuous beam	Ramovski sistem Frame
Električna energija Electric energy [kWh]	1.667,50	1.557,26	1.730,17
Benzin Gasoline [l]	28,43	12,44	11,85
Dizel Diesel [l]	15.123,20	12.226,51	14.081,01
Ukupno Total [kWh]	95.784,60	77.524,13	89.235,41



Grafik 4. Vezana energija ugrađenih materijala
 Chart 4. Embodied energy of embedded materials, [GJ/t], [7], [8], [9]



Grafik 5. Ukupan energetska utrošak mehanizacije
 Chart 5. Total energy consumption of the machinery [kWh]

Količina energetskog utroška po toni proizvedenog betona višestruko je manja od količine energije utrošene po toni proizvedenih armature i asfalta, što će se odraziti na dobijene rezultate.

The amount of energy consumption per tone of concrete is several times smaller than the amount of consumed energy per tone of steel rebar and asphalt, which will be reflected in the obtained results.

Zbog masenog udela ugrađenih materijala, najveća količina energije će biti utrošena pri proizvodnji betona, što se može i videti na *Graficima 6. i 7.* Na *Grafiku 5.* prikazan je energetska utrošak mehanizacije, koji je najmanji za drugu konstrukciju (2).

Međutim, energetska utrošak mehanizacije je prilično mali u poređenju sa energetska utroškom za beton, čelik i asfalt. Samim tim, količina vezane energije od mehanizacije dosta je mala u poređenju sa ukupnom vrednošću.

Na *Graficima 6. i 7.* vidi se uticaj količine betona ugrađenog u konstrukciju, na odnos svakog procesa u ukupnoj količini vezane energije.

Sve tri konstrukcije su prethodno napregnuti betonski mostovi, s dominantnim udelom betona u zapreminskom i masenom odnosu ugrađenih materijala. Samim tim, relevantna jedinica, po kojoj će biti izvršena analiza rezultata, biće kubni metar betona.

Due to the mass fraction of the incorporated materials, the largest amounts of energy consumption will be in the production of concrete, as can be seen at the *Charts 6. and 7.* *Chart 5.* shows the energy consumption of the machinery, which is the smallest for the second structure (2).

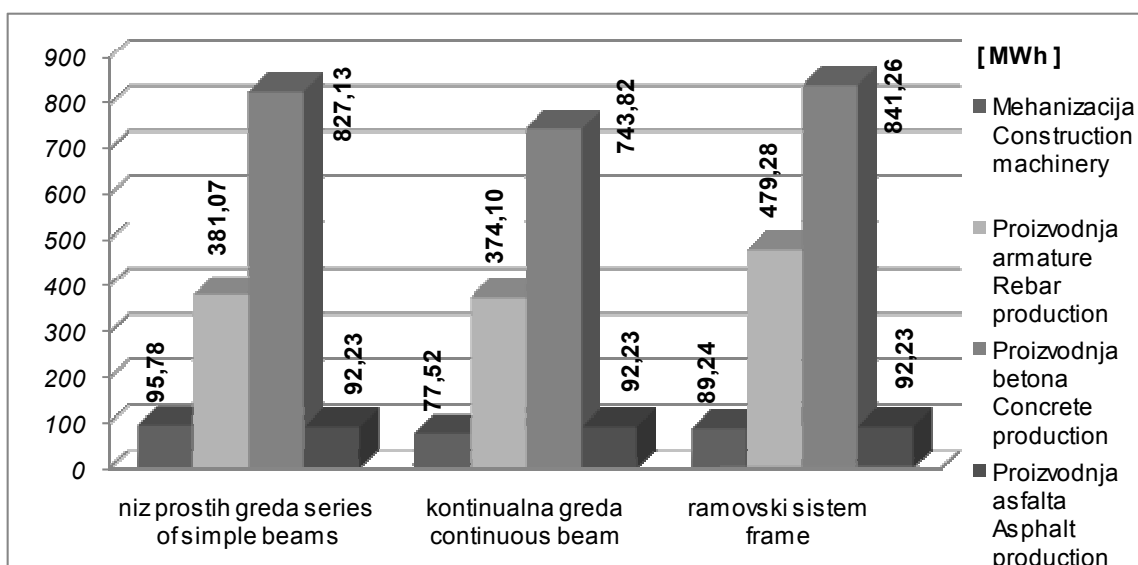
However, the energy consumption of the machinery is quite small, compared to the energy consumption for concrete, steel and asphalt production process. Therefore, the amount of embodied energy from the machinery will be quite small in comparison with the total value.

Charts 6. and 7. show the impact of quantity of concrete embedded in the structure, to each process ratio in the total amount of embodied energy.

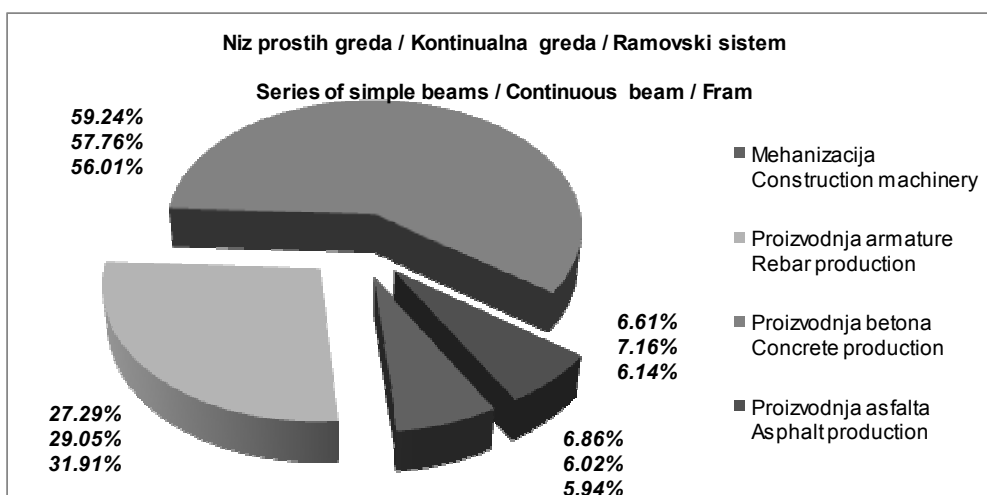
All three structures are prestressed concrete bridges, with a dominant percentage of concrete in the volume and mass ratio of all used materials. Therefore, the relevant unit, per which the analysis of the results will be done, is going to be a cubic meter of concrete.

Tabela 4. Ukupna količina vezane energije
Table 4. Total amount of embodied energy

<i>Ukupna količina energije</i> <i>Total energy amount [MWh]</i>	<i>Niz prostih greda</i> <i>Series of simple beams</i>	<i>Kontinualni nosač</i> <i>Continuous beam</i>	<i>Ramovski sistem</i> <i>Frame</i>
<i>Mehanizacija</i> <i>Construction machinery</i>	95,78	77,52	89,24
<i>Proizvodnja armature</i> <i>Steel rebar production</i>	381,07	374,10	479,28
<i>Proizvodnja betona</i> <i>Concrete production</i>	827,13	743,82	841,26
<i>Proizvodnja asfalta</i> <i>Asphalt production</i>	92,23	92,23	92,23
<i>Ukupno</i> <i>Total</i>	1.396,21	1.287,67	1.502,00



Grafik 6. Ukupna količina vezane energije po procesu
Chart 6. Total amount of embodied energy per production process



Grafik 7. Udeo u količini vezane energije po procesu
Chart 7. Proportional share in total embodied energy amount, per process

Grafik 8. prikazuje odnos ukupne količine vezane energije sve tri konstrukcije, kao i vezanu energiju projektovanu na jedan kubni metar betona. Razlike u ukupnoj količini utrošene energije u poređenju s najpovoljnijim slučajem – što je drugo konstruktivno rešenje (2) – iznose približno 10% više u odnosu na prvo (1), odnosno 15% više energije u odnosu na treće rešenje (3).

Razlika u količini vezane energije, po kubnom metru betona ugrađenog u konstrukciju, u odnosu na drugu konstrukciju (2) iznosi približno 2,5% manje za prvo (1), odnosno približno 3% više za treće rešenje (3).

Pri približnom međusobnom odnosu betona, armature i asfalta u sva tri rešenja i pri upotrebi istog tipa mehanizacije, ukupna količina vezane energije najviše bi varirala u zavisnosti od količine betona i armature ugrađenih u konstrukciju.

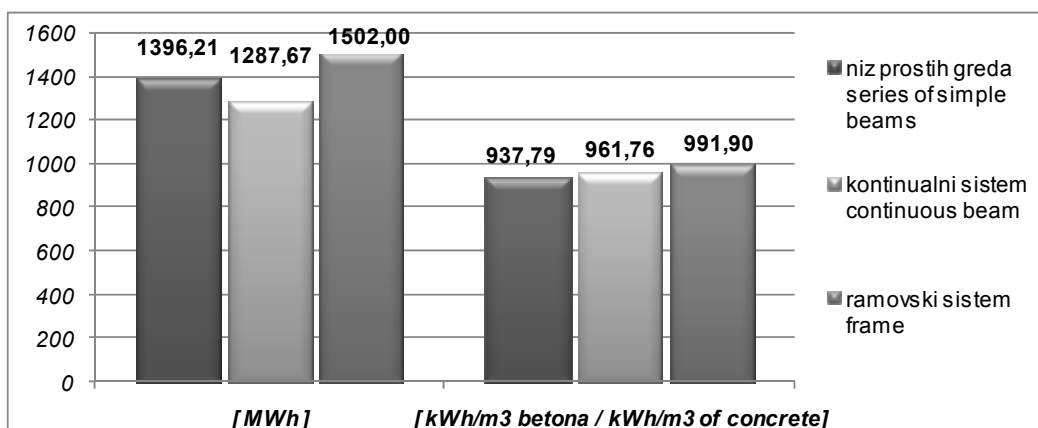
Najmanja količina vezane energije po m^3 betona jeste u prvoj konstrukciji (1), ali to ne rezultuje i najmanjom ukupnom količinom vezane energije u prvoj konstrukciji (1), nego u drugoj (2), što je posledica različite količine utrošenog materijala, u zavisnosti od konstrukcije (*Grafik 8*).

Chart 8. displays the ratio of total amounts of embodied energy for all three constructions, as well as the total amounts of embodied energy per one cubic meter of concrete. The differences in the total amount of used energy, when compared with the most favourable case, which is the 2nd structural solution (2), are approximately 10% more for the first (1), and 15% more energy used for the third solution (3).

The difference in the amount embodied energy per cubic meter of concrete, embedded into structure, compared to other structure (2) is approximately 2.5% less for first (1), and approximately 3% more for third solution (3).

At an approximate mutual relation of concrete, rebar and asphalt in all three solutions and with the use of the same type of machinery, the total amount of embodied energy vary the most depending on the amount of concrete and steel rebar, embedded in the structure.

The smallest amount of embodied energy per m^3 of concrete is in the first structure (1), but it does not result in the lowest total amount of embodied energy in first solution (1), but in second (2), which is the result of different material quantities used for each structure, *Chart 8*.



Grafik 8. Ukupna količina vezane energije
Chart 8. Total amount of embodied energy

5 EMISIJA CO₂ KAO NUSPRODUKT ENERGETSKOG UTROŠKA

Za proračun emisije CO₂ od mehanizacije, korišćene su vrednosti koje prikazuju prosečnu emisiju CO₂ na teritoriji Srbije [10], u zavisnosti tipa energenta koji se koristi za rad mašine:

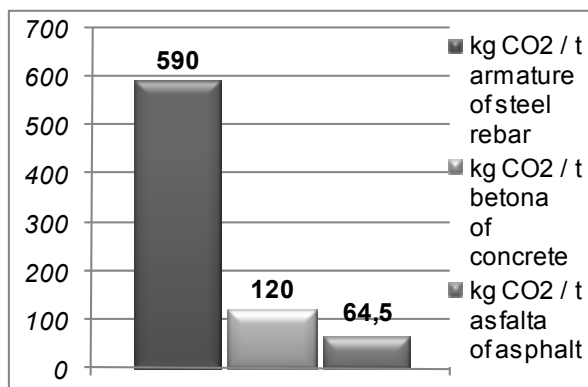
- električna energija: 0,71779 $\frac{\text{kg (CO}_2\text{)}}{\text{kWh}}$
- benzin: 2,3035 $\frac{\text{kg (CO}_2\text{)}}{\text{l}}$
- dizel: 2,6256 $\frac{\text{kg (CO}_2\text{)}}{\text{l}}$

Proizvodnja čelika zasniva se na korišćenju proizvoda na bazi uglja, a posledica toga jeste emisija velike količine CO₂. Emisija CO₂ po proizvedenoj toni armature u elektrolučnoj peći, prikazana je na *Grafiku 9* [7].

Vrednosti emisije CO₂ pri proizvodnji betona i asfalta su preuzete iz dva izveštaja kanadskog Instituta Atina (*Athena Sustainable Materials Institute*). Preuzete su vrednosti emisije CO₂ pri proizvodnji betona, čije karakteristike najviše odgovaraju karakteristikama betona marke MB 40 po SRPS-u, [8], *Grafik 9*. Za asfalt je korišćena vrednost emisije CO₂ za mešavinu bez udela recikliranog materijala, [9] – *Grafik 9*.

Proračun emisije CO₂ od mehanizacije, na osnovu utrošene energije, učinjen je na osnovu podataka *Internacionalne Agencije za Energiju (IEA – International Energy Agency [11])*.

Na *Grafiku 10*. data je vrednost emisije ugljen-dioksida pri upotrebi mehanizacije. Vidi se da se zadržao približan odnos među konstrukcijskim rešenjima, kao i na *Grafiku 5*, kao i direktna uslovljenost emisije CO₂ količinom utrošene energije u slučaju upotrebe mehanizacije.



Grafik 9. Emisija CO₂ po toni proizvedenog materijala
Chart 9. CO₂ emission per tonne of construction material, [7], [8], [9]

U *Tabeli 5.* i na *Graficima 11. i 12.*, primetno je da je – kao i u slučaju analize vezane energije – dominantna količina CO₂ emitovana u procesu proizvodnje betona, kao najzastupljenijeg materijala u sve tri konstrukcije.

5 CO₂ EMISSION AS A BYPRODUCT OF ENERGY CONSUMPTION

To calculate CO₂ emission from the machinery, the values that show the average CO₂ emissions on the territory of Republic of Serbia were used [10], depending on the type of energy used to operate the machine:

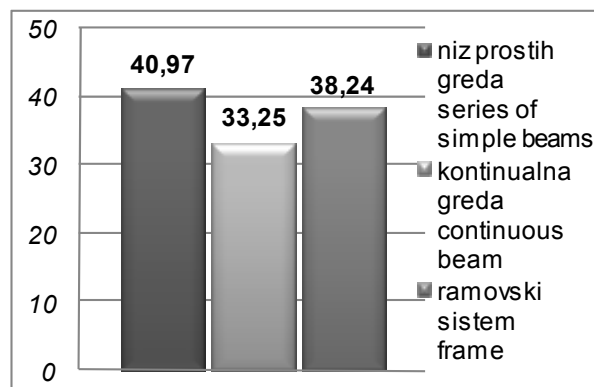
- electrical energy: 0,71779 $\frac{\text{kg (CO}_2\text{)}}{\text{kWh}}$
- gasoline: 2,3035 $\frac{\text{kg (CO}_2\text{)}}{\text{l}}$
- diesel: 2,6256 $\frac{\text{kg (CO}_2\text{)}}{\text{l}}$

Production of steel is based on the use of coal products, which results in the emission of large amounts of CO₂. CO₂ emissions per tone of steel rebar produced in electric arc furnace are shown in *Chart 9* [7].

The data that represent CO₂ emissions from the production process of concrete and asphalt are taken from two reports of the Canadian *Athena Sustainable Materials Institute*. The values of CO₂ emissions in concrete production, whose characteristics correspond the most with the characteristics of concrete, MB 40 according to SRPS, are used, [8], *Chart 9*. CO₂ emission data from the asphalt production is taken for a mixture without the share of recycled material, [9], *Chart 9*.

Calculation of CO₂ emission of machinery, based on its energy consumption was made based on the data of the IEA (*International Energy Agency*) [11].

Chart 10. displays the value of carbon dioxide emission from the use of machinery. The ratio of CO₂ emission between the structural solutions remained similar, like on the *Chart 5.* and the direct conditionality between CO₂ emission and the amount of energy consumption by the machinery can be seen.

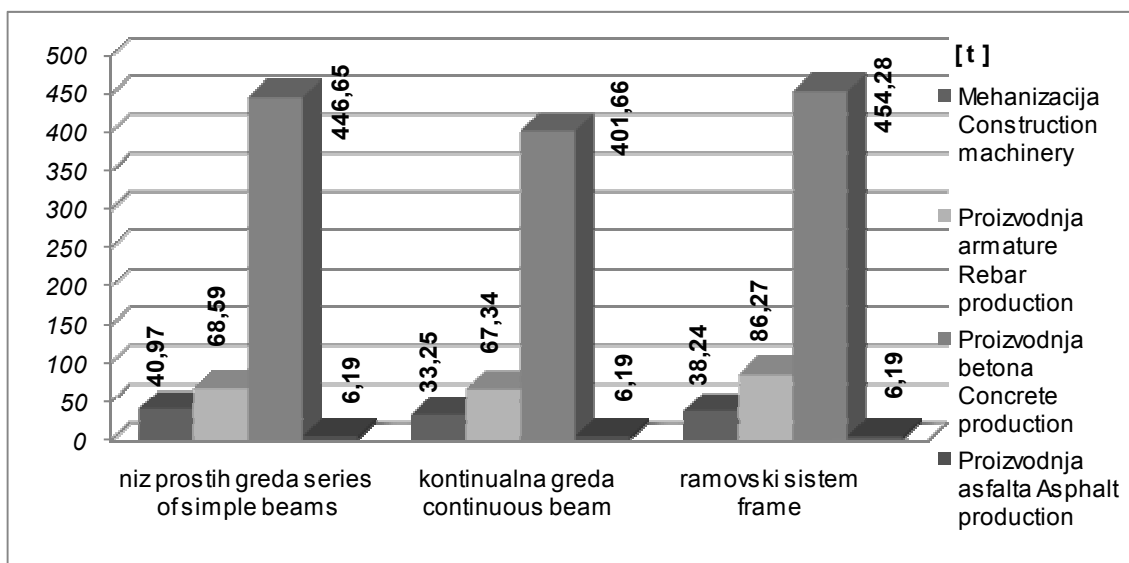


Grafik 10. Ukupna emisija CO₂ od mehanizacije
Chart 10. Total CO₂ emission of the machinery [t]

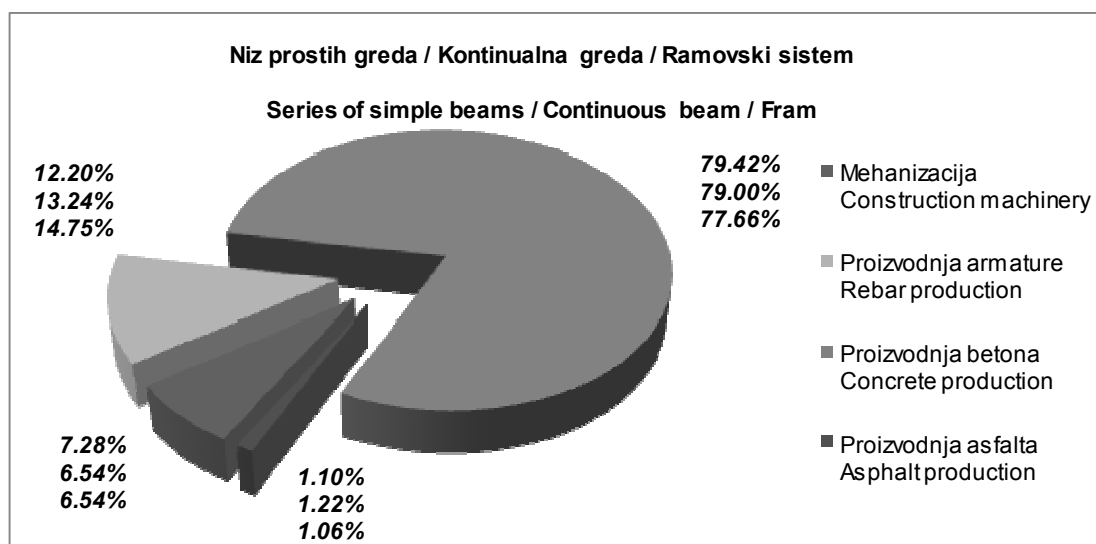
It is noticeable (*Table 5.* and *Charts 11. and 12.*) that, as in the case of embodied energy analysis, the dominant amount of CO₂ is emitted in the production process of concrete, as predominant material in all three constructions.

Tabela 5. Ukupna emisija CO₂
Table 5. Total CO₂ emission

Ukupna emisija CO ₂ Total emission of CO ₂ [t]	Niz prostih greda Series of simple beams	Kontinualni nosač Continuous beam	Ramovski sistem Frame
Mehanizacija Construction machinery	40.97	33.25	38.24
Proizvodnja armature Steel rebar production	68.59	67.34	86.27
Proizvodnja betona Concrete production	446.65	401.66	454.28
Proizvodnja asfalta Asphalt production	6.19	6.19	6.19
Ukupno Total	562.40	508.44	584.98



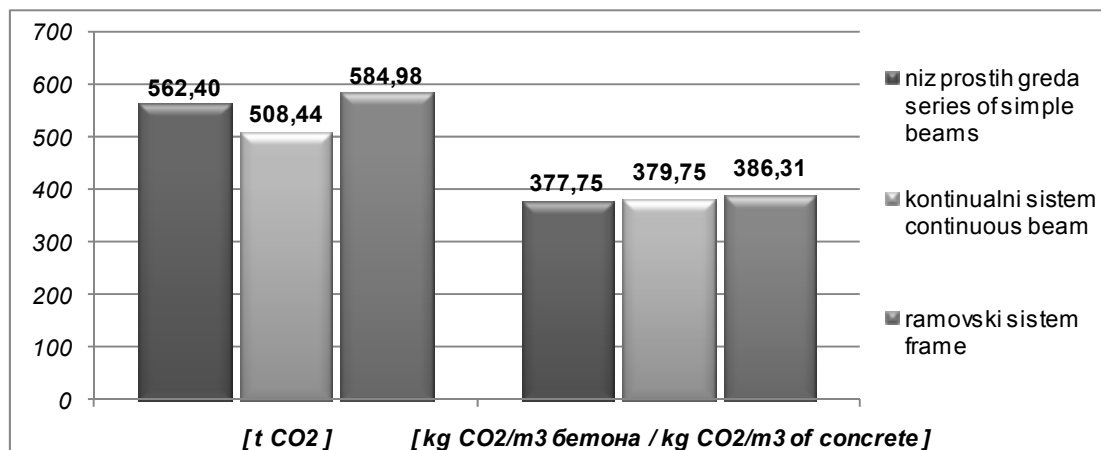
Grafik 11. Ukupna emisija CO₂ po procesu
Chart 11. Total CO₂ emission per process



Grafik 12. Udeo u emisiji CO₂ po procesu
Chart 12. Proportional share in total CO₂ emission, per process

Na *Graficima 11. i 12.* vidi se da u ovom slučaju još veći udeo emitovanog ugljen-dioksida u ukupnoj količini, dolazi od energetskog utroška pri proizvodnji betona. Emisija CO₂ od proizvodnje armature dosta je manja u poređenju sa udelom vezane energije pri istom procesu, a emisija CO₂ od asfalta je u granicama od svega 1–1.5%. Ovi rezultati su posledica emisije CO₂ po jedinici materijala (*kg CO₂/t*), kao i njihovog zapreminskog udela u ukupnoj količini materijala u svakoj konstrukciji.

On the *Charts 11. and 12.* can be seen, that in the case of CO₂ emission analysis, an even greater proportion of CO₂ emission in the total amount comes from the energy used in concrete production. CO₂ emission from the production of steel rebar is a lot less, comparing to the energy consumed in the same process, and the CO₂ emission from the asphalt production process is in the range of 1 -1.5%. This is the result of CO₂ emission per unit of material (*kg CO₂/ton*), as well as their share in the total amount of materials used in each structure.



Grafik 13. Ukupna emisija CO₂
Chart 13. Total CO₂ emission

Grafik 13. prikazuje odnos ukupne emisije CO₂ za sve tri konstrukcije, kao i emisiju CO₂ po jednom kubnom metru betona. Razlike u ukupnoj količini emisije CO₂ u poređenju s najpovoljnijim slučajem – drugim konstruktivnim rešenjem (2), iznose približno 10% više od prvog rešenja (1), odnosno 15% više energije u odnosu na treće rešenje (3).

Možemo primetiti da su procentualni odnosi skoro isti kao procentualni odnosi nastali pri analizi vezane energije po kubnom metru betona.

Razlika u emisiji CO₂, po kubnom metru betona ugrađenog u konstrukciju, u odnosu na drugu konstrukciju (2) iznosi približno 0,5% manje za prvo (1), odnosno približno 1,75% više za treće rešenje (3). To je, takođe, posledica različite količine utrošenog materijala, u zavisnosti od konstrukcije, i male procentualne razlike u emisiji CO₂ po m³ betona.

Najmanja emisija CO₂ po m³ betona jeste za prvu konstrukciju (1), ali to ne rezultuje i najmanjom ukupnom emisijom CO₂ kod prve konstrukcije (1), nego kod druge (2), što je posledica različite količine utrošenog materijala, u zavisnosti od konstrukcije – *Grafik 13.*

Na *Grafiku 14.* prikazan je odnos ukupne količine vezane energije i emisije CO₂ za tri razmatrana konstrukcijska rešenja. Na osnovu svih prethodno sračunatih vrednosti, primetna je direktna uslovljenost na relaciji izbora konstruktivnog rešenja, količine i tipa utrošenog materijala, vezane energije i emisije CO₂.

Pri analizi vezane energije i emisije ugljen-dioksida, detaljno su razmatrani učinci mašina koje učestvuju u navedenim procesima i njihova potrošnja energenata. Podaci koji su korišćeni za proračun vezane energije i

Chart 13. shows the total CO₂ emission ratio for all three structures, as well as the CO₂ emission per cubic meter of concrete. The differences in the total amount of CO₂ emission, compared to the most favourable case – 2nd structural solution (2), are approximately 10% more than in the first (1), or 15% more energy compared to the third solution (3).

We can notice that the percentage ratio is almost the same as the percentage ratio incurred in the analysis of the embodied energy per cubic meter of concrete.

The difference in CO₂ emission per cubic meter of concrete, embedded into structure, compared to the 2nd structure (2) totals approximately 0.5% less than the first (1) and 1.75% more amount for the third solution (3). This is also a result of different amounts of used construction materials, and small percentage differences in CO₂ emissions per m³ of concrete.

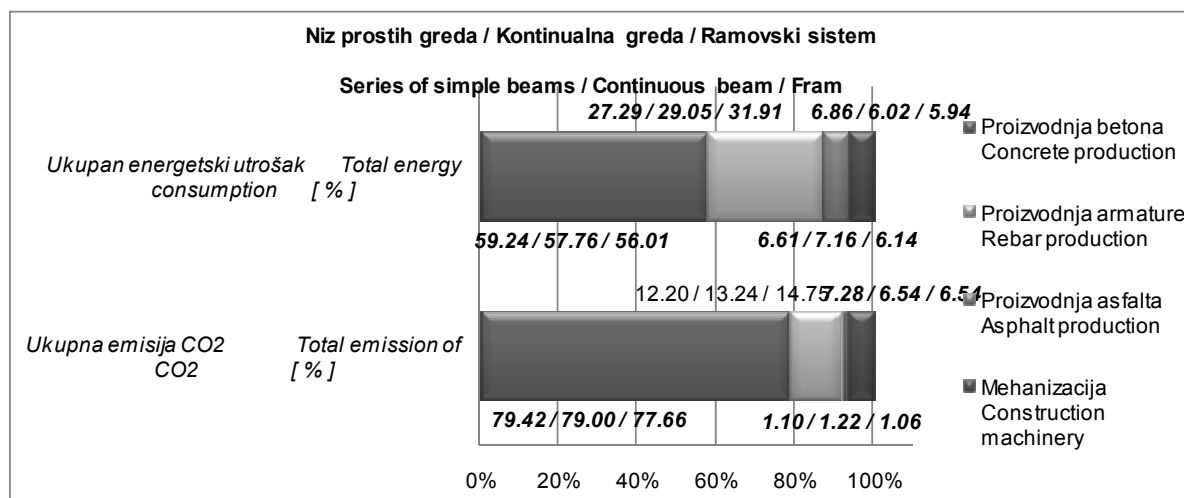
The lowest CO₂ emission per m³ of concrete is for the first structure (1), but it does not result in the lowest total CO₂ emissions for the first structure (1) but in the 2nd (2), which is a result of different amounts of used materials, built in structures, *Chart 13.*

The *Chart 14.* shows the participation per process in the total amount of embodied energy and CO₂ emission for three structural solutions. Based on all of the previously calculated values, there is a noticeable direct causality between the choice of structural solution, the amount and type of used materials, and embodied energy and emission of CO₂.

In the analysis of embodied energy and carbon dioxide emission, the effectiveness of machinery involved in construction processes and their consumption of

emisiju CO₂ u procesima proizvodnje konstruktivnih materijala, korišćeni su iz navedenih izvora [7], [8], [9], [10], [11].

energy were considered in detail. The data used for the calculation of embodied energy and CO₂ emissions in the production processes of construction materials, was retrieved from sources [7], [8], [9], [10], [11].



Grafik 14. Procentualni udeo vezane energije i emisije CO₂, po procesu
 Chart 14. Participation of embodied energy and CO₂ emission, per process

6 ZAKLJUČCI

Analizom dobijenih rezultata, prikazana je direktna veza između konstruktivnog rešenja, načina izvođenja, količine utrošenog materijala i vezane energije, kao i emisije CO₂, odnosno uticaja na životnu sredinu.

Svaki korak proračuna uslovljen je prethodno usvojenim rešenjima i ulaznim parametrima. Izbor statičkog sistema konstrukcije direktno se odražava na oblik, dimenzije i broj konstruktivnih elemenata i količine konstrukcionih materijala. Osim toga, trajanje radova i količina utrošene energije uslovljeni su odabirom i karakteristikama mehanizacije i planom izvođenja konstrukcije. Sve to se odražava na količinu vezane energije objekta (mosta), na osnovu prikazanih rezultata proračuna vezane energije i emisije CO₂.

U ovom radu prikazan je jedan mogući način procene vezane energije i emisije CO₂ u procesu gradnje betonskih grednih mostova, koji je baziran na proračunu količina u svim glavnim koracima realizacije konstrukcije i obuhvata sve glavne generatore konačnog rezultata.

Razmatranje međusobne uslovljenosti glavnih koraka u projektovanju i izvođenju mostova daje uvid u to na koji se način ovi procesi odražavaju na energetski aspekt i emisiju štetnih elemenata na našu okolinu. Prikazani rezultati omogućavaju da se bolje sagleda uticaj pojedinih činilaca, ukoliko se kao dodatni kriterijum pri projektovanju uključi i ekološki aspekt.

Dati su kvantitativni rezultati vezane energije i emisije CO₂ za tri konstrukcije mosta različitih statičkih sistema i iste ukupne dužine mosta, svedeni na m³ ugrađenog betona. Prikazano je i procentualno učešće pojedinih komponenti u ukupnom rezultatu kod svih razmatranih primera konstrukcija. Dobijene vrednosti vezane energije iznosile su oko 1000 kWh, a emisija ugljenika oko 400 kg CO₂, po m³ ugrađenog betona. Direktna veza

6 CONCLUSIONS

The analysis of the obtained results shows direct correlation between the structural design, construction methods, quantity of used materials and embodied energy, as well as CO₂ emission and its environmental impact.

Each step of calculation procedure is conditioned by the previously adopted solutions and input parameters. The choice of structural system directly affects the shape, dimensions and number of structural elements and the quantity of construction materials. In addition, the duration of construction works and the amount of embodied energy are conditioned by the selection and the characteristics of machinery and construction plan. Based on the presented results of calculation, the amount of embodied energy of the object (bridge) and CO₂ emission are consequently affected by selected solutions.

Paper presents a possible method for evaluation of embodied energy and CO₂ emission in the process of construction of concrete girder bridges. The method is based on calculation of the amounts in all main steps of the construction and it includes all main generators of the final result.

Correlation of the main steps in the design and construction process of a bridge affects the energy aspect and the emission of harmful elements. Presented results enable better recognition of the impact of certain factors, when the environmental aspect is an additional criterion in the design.

Quantitative results of the embodied energy and CO₂ emission, for three bridge structures of different structural system and equal total length of the bridge per m³ of concrete are presented. The participation of individual components in the total result, in all considered examples of the structures is shown. The obtained values were approximately 1000 kWh of embodied energy and - ap-

konstruktivnog sistema i vezane energije i emisije CO₂ izražava se različitim količinama ukupnih materijala potrebnim za izgradnju mosta na određenoj lokaciji, kada se primenjuju različita konstrukcijska rešenja.

7 LITERATURA REFERENCES

- [1] Guangli Du, Raid Karoumi, *Environmental life cycle assessment comparison between two bridge types: reinforced concrete bridge and steel composite bridge*, pg. 1, Third international conference on sustainable construction materials and technologies (Kyoto, Japan, August 2013)
- [2] Connal, J and Berndt, M. *Sustainable Bridges – 300 Year Design Life for Second Gateway Bridge*. Proceedings, Austroads Bridges Conference, Auckland, 2009, pp. 1-16.
- [3] Aleksandar Pakvor, Radomir Folić, *Dejstva na konstrukcije – knjiga 1*, izdavač: Građevinski fakultet u Beogradu, Beograd 1995.
- [4] Mijat S. Trojanović, *Betonski mostovi I*, 1970. Beograd
- [5] Predrag Petronijević, Nenad Ivanišević, Dragan Arizanović, *Primena računarskog programa CESAD pri izboru građevinskih mašina, zbornik radova ISBN – 978-86-85073-09-0, str. 397–402*, Društvo građevinskih konstruktera Srbije, 13. kongres, Zlatibor - „Čigota”, 22–24. septembar 2010.
- [6] *“Construction Equipment, Ownership and Operating, Expense Schedule - Region III”*, U.S.

REZIME

ANALIZA VEZANE ENERGIJE I EMISIJE CO₂ ZA IZVOĐENJE MOSTOVSKJE KONSTRUKCIJE SA STANOVIŠTA ODRŽIVOSTI

Miloš ČOKIĆ
Predrag PETRONIJEVIĆ
Marija S. TODOROVIĆ
Nenad PEČIĆ

U radu je prikazana uporedna analiza vezane energije i emisije CO₂ u procesu gradnje, za tri mostovske konstrukcije. Analizirane konstrukcije su prethodno napregnuti betonski mostovi, različitih statičkih sistema, ukupne dužine 88 metara.

Razmatrana je međusobna uslovljenost izbora konstruktivnih rešenja, načina izvođenja konstrukcije, količine utrošenog materijala, vezane energije i emisije CO₂.

Dat je uvid u način na koji se glavni koraci u projektovanju i izvođenju mostova odražavaju na energetski utrošak i emisiju CO₂, procentualno i u ukupnom iznosu.

Dobijeni rezultati bi trebalo da omoguće bolje sagledavanje uticaja pojedinih faktora u procesu izvođenja mostova i njihov uticaj na životnu sredinu.

Ključne reči: Vezana energija, Emisija CO₂, Mostovske konstrukcije, Održivost, Ekološki aspekt

proximately 400 kg of CO₂ emission per m³ of built in concrete. Direct correlation of structural system and embodied energy and CO₂ emission is expressed through different total quantities of the materials necessary for the construction of bridge at a particular location, when different structural solutions are applied.

- Army Corps of Engineers, EP 1110-1-8, Volume 3, November 2009
- [7] Hans Sandberg, Rune Lagneborg, Birgitta Lindblad, Helén Axelsson and Lars Bentell, *CO₂ emissions of the Swedish steel industry*, Scandinavian Journal of Metallurgy 2001; 30: 420–425, Table 2
- [8] *Cement and structural concrete products: life cycle inventory update #2*, Prepared by Athena Sustainable Materials Institute, Ottawa, Canada, 2005; Table 11.3, Table 13.5
- [9] *A life cycle perspective on concrete and asphalt roadways: Embodied primary energy and global warming potential*, Athena Sustainable Materials Institute, Ottawa, Submitted to: Cement Association of Canada, September 2006, Table 3.3
- [10] Tools for consumers and designers of solar, <http://www.sunearthtools.com/>, pristupljeno podacima: 2014.
- [11] International Energy Agency (IEA), <http://www.iea.org>, pristupljeno podacima: 2014.

SUMMARY

ANALYSIS OF THE EMBODIED ENERGY AND THE CO₂ EMISSION IN CONSTRUCTION PROCESS OF A BRIDGE STRUCTURE FROM THE ASPECT OF SUSTAINABILITY

Miloš ČOKIĆ
Predrag PETRONIJEVIĆ
Marija S. TODOROVIĆ
Nenad PEČIĆ

This paper presents a comparative analysis of embodied energy and CO₂ emission, in the construction process of three bridge structures. Analyzed structures are prestressed concrete bridges with different structural systems and a total length of 88 meters.

The correlation of structural system, construction method, material quantities and embodied energy and CO₂ emission were considered.

Influence of the selected solutions in main steps of design and construction on the energy consumption and the emission of CO₂ is presented.

The results should provide a better understanding of the effects of certain factors, in the bridge construction process, and their impact on the environment.

Key words: Embodied energy, CO₂ emission, Bridge structures, Sustainability, Environmental aspect

OJAČANJE FRCM KOMPOZITIMA ZIDANIH ZIDOVA OD BLOK OPEKE

STRENGTHENING MASONRY WALLS MADE OF BRICK BLOCKS WITH FRCM COMPOSITES

Željka RADOVANOVIĆ
Sretena DIMOVSKI
Ilija LALOŠEVIĆ

ORIGINALNI NAUČNI RAD
ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER
UDK: 692.2:693.2
doi:10.5937/grmk1502021R

1 UVOD

Zidane konstrukcije od kamena obilježavaju tradicionalno građevinarstvo Crne Gore. Danas, prema slobodnoj procjeni autora, u objektima sa zidanom konstrukcijom, zidanom od blok opeke ili rjeđe od betonskog bloka, stanuje skoro polovina stanovnika Crne Gore. Zidarija je jeftin građevinski materijal koji se tradicionalno koristi u stambenoj izgradnji i najvjerovatnije će još dugo imati primat u odnosu na druge građevinske materijale. Trenutno stanje zidanih konstrukcija u crnogorskom građevinarstvu nije ohrabrujuće. Vrlo često objekti se izvode sa elementima za zidanje neadekvatnih fizičkomehaničkih karakteristika, kontrola materijala vrši se vrlo rijetko, a nadzor nad građenjem zidanih objekata po pravilu izostaje.

U razornom zemljotresu, koji je pogodio crnogorsko primorje 15.04.1979. godine, s magnitudom 7.0 jedinica Rihterove skale, značajna razaranja zabilježena su u starim gradskim jezgrama primorskih gradova, kao i u ruralnim naseljima. Usljed dejstva zemljotresa, oštećen je veliki broj spomenika kulture, kao i brojni individualni objekti. Mnogi javni i stambeni objekti izgrađeni od kamena ostali su neobnovljeni. Na osnovu iskustava stečenih nakon crnogorskog zemljotresa, ali i na osnovu podataka iznesenih u radovima objavljenim nakon zemljotresa koji su se dogodili u protekloj deceniji na teritoriji

1 INTRODUCTION

Stone masonry structures mark traditional civil engineering in Montenegro. Today, according to free estimate of the author, half of Montenegro population live in buildings with masonry structures made of brick blocks and rarely from concrete blocks. Masonry is cheap material that is traditionally used in building constructions and probably it will take precedence over other building materials in a long time. Currently state of masonry structures in Montenegrin civil engineering is not encouraging. Very often the buildings are constructed with masonry units with inadequate mechanical properties, control of materials are done rarely, and supervision of masonry buildings construction cannot be done, as a rule.

In destructive earthquake, which hit Montenegrin littoral on 15 April 1979 with magnitude of 7.0 degree Richter scale, important devastation was registered in old urban cores of littoral towns and in rural settlements. Large number of cultural heritages and numerous individual objects were damaged due to earthquake actions. Numerous public and residential buildings have not been renovated. Based on the experience gained after Montenegro earthquake and based on the data which have been presented in published paper after earthquakes that happened in last decade on the terri-

Željka Radovanović, Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore, Džordža Vašingtona b.b, 81000 Podgorica, radovanovic@t-com.me
Sretena Dimovski, Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore, Džordža Vašingtona b.b, 81000 Podgorica, sretenadimovski@gmail.com
Ilija Lalošević, Arhitektonski fakultet Univerziteta Crne Gore, Džordža Vašingtona b.b, 81000 Podgorica, ilalos@t-com.me

Zeljka Radovanovic, University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering, Džordža Vasingtona b.b, 81000 Podgorica, radovanovic@t-com.me
Sretena Dimovski, University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering, Džordža Vasingtona b.b, 81000 Podgorica, sretenadimovski@gmail.com
Ilija Lalošević, University of Montenegro, Faculty of Architecture, Džordža Vasingtona b.b, 81000 Podgorica, ilalos@t-com.me

Italije i Turske, zaključuje se da se usljed dejstava budućih zemljotresa najveći broj žrtava i najveći stepen šteta može očekivati u objektima sa zidanom konstrukcijom.

Najefikasniji način da se smanji broj žrtava i ublaže efekti zemljotresa jeste ugrađivanje teorijskih i eksperimentalnih istraživanja, kao i iskustvenih saznanja o ponašanju zidanih konstrukcija za vrijeme zemljotresa, u odredbe propisa prema kojima se vrši: konstruisanje, dimenzionisanje, sanacija i održavanje konstrukcija. Motivisani ovim činjenicama, na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore pokrenuli smo istraživanja u oblasti zidanih konstrukcija, koja se odvijaju u okviru nacionalnog istraživačkog projekta SROKO „Smanjenje seizmičkog rizika za objekte od kamena i opeke”.

Cilj istraživanja jeste da se definišu mehaničke karakteristike zidova od materijala koji se uobičajeno koriste za zidanje zidanih konstrukcija, ali i predvide jeftine i jednostavne metode sanacije postojećih objekata sa zidanom konstrukcijom. Testiranja, obavljena u laboratoriji Građevinskog fakulteta, tekla su u dva pravca. Testirani su elementi za zidanje i malteri od kojih su uzorci zidova napravljeni, a potom su izvedena i testiranja serija uzoraka zidova na centrični pritisak i na smicanje. Smicanje je testirano na uzorcima na koje je sila pritiska aplicirana po dijagonali. Paralelno je teklo ispitivanje materijala koji su dostupni na tržištu, a mogu biti iskorišćeni za jednostavno vanjsko ojačavanje zidanih zidova od blok opeke.

2 ODREĐIVANJE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA ZIDOVA OD BLOK OPEKE

Zidarija je nehomogen i neizotropan materijal, koji ima relativno dobar kapacitet na pritisak, ali mali kapacitet nosivosti na zatezanje i smicanje. Zidane konstrukcije svrstavaju se u masivne konstruktivne sisteme s relativno velikom površinom zidova, te vertikalno opterećenje zidane konstrukcije prihvataju obično bez većih problema. Uspješno projektovanje zidanih konstrukcija zasniva se na pravilnom definisanju mehaničkih karakteristika zidanih zidova: karakteristične čvrstoće na pritisak, modula elastičnosti, modula smicanja, čvrstoće na klizanje i čvrstoće na smicanje, odnosno graničnih vrijednosti glavnih napona zatezanja. U okviru projekta SROKO, sprovedena su ispitivanja karakteristične čvrstoće na pritisak, modula elastičnosti i graničnih vrijednosti glavnih napona zatezanja na uzorcima, zidovima od tri vrste elemenata za zidanje, zidanim s tri klase maltera. Pri izboru elemenata za zidanje, vodilo se računa o saznanju da se u Crnoj Gori vrlo često za zidanje nosivih zidova u objektima sa zidanom konstrukcijom koriste vrste elemenata za zidanje, koji nemaju dovoljnu čvrstoću na pritisak i koji po svojim fizičko-mehaničkim svojstvima mogu biti korišćeni samo za zidanje pregradnih zidova ili zidanje zidova ispune u armiranobetonskim konstrukcijama. Ovakva praksa bila je naročito izražena devedesetih godina XX veka, u periodu nametnutih ekonomskih sankcija.

Testiranja su sprovedena na uzorcima zidova koji su napravljeni od šuplje blok opeke (dimenzija 250x120x65 mm), blok opeke (dimenzija 250x190x190 mm) i

tory of Italy and Turkey, it can be concluded that due to actions of future earthquakes the large numbers of humans victims and great number of damages can be expected in buildings with masonry structures.

The most effective way to reduce the number of victims and mitigate effects of earthquakes is to carry out theoretical and experimental research, as an empirical knowledge on the behaviour of masonry structures due to earthquakes; in accordance with the provisions of regulation we did: design, dimensioning, revitalization and maintenance of structures. Motivated by these facts at the Faculty of Civil Engineering, University of Montenegro, we launched the research in the field of masonry structures which takes place in the framework of a national research project SROKO "Reducing the seismic risk for buildings made of stone and brick."

The aim of the research is to define mechanical properties of the walls made of materials which are used traditionally for construction of masonry structures and predict cheap and easy method for recovery and strengthening existing buildings with masonry structures. Testing, that were conducted in Laboratory of Faculty of Civil Engineering, were performed in two directions. The masonry units and mortars from which the walls samples were made were tested, and after that testing of series of walls samples were performed on central compression and on shear. Shear is tested on the specimens on which the compression forces have been applied on the diagonal. Testing materials that are available in the market and can be used for easy external strengthening of masonry walls made of brick blocks, has been performed in parallel.

2 DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF BRICK BLOCKS WALLS

Masonry is inhomogeneous and anisotropic material which has relatively good capacity on compression but small load capacity in tension and shear. Masonry structures belong to a massive structural system with relatively large surface of the walls and vertical load masonry generally accepted without much trouble. The successful design of masonry structures is based on the regular definition of the mechanical properties of masonry walls: characteristic compressive strength, elastic modulus, shear modulus, strength on the sliding and shear strength or limit values for the main tensile stress. Within the project SROKO, the tests of characteristic compressive strength, elastic modulus and limit values for the main tensile stress on the walls samples from three masonry units types made on three mortar classes are conducted. In the selection of masonry units for brickwork the following facts were taken into account: in Montenegro masonry unites which have insufficient compressive strength and can be used only for partition walls or masonry infill walls in reinforced concrete structures are used very often for building of bearing walls in the buildings with masonry structures. This practice had been especially pronounced in the nineties in the period of imposed economic sanctions.

The testing were performed on the walls samples which were made from hollow brick blocks (dimensions 250x120x65 mm), brick blocks (dimensions 250x190x190 mm) and concrete blocks (dimensions

betonskog bloka (dimenzija 380x190x190 mm). U ovom radu će biti prikazani samo rezultati ispitivanja na zidovima od šuplje blok opeke i blok opeke.


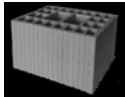
Standardi iz oblasti zidanih konstrukcija dozvoljavaju da se – u nedostatku konkretnih eksperimentalnih rezultata – karakteristične čvrstoće zidanih zidova pri pritisku određuju na bazi analitičkih izraza u kojima kao osnovni parametri figurišu: srednja vrijednost čvrstoće na pritisak elementa za zidanje i vrijednosti čvrstoće maltera na pritisak. Stoga, ovi parametri definisani su na početku naučnoistraživačkog projekta.

2.1 Čvrstoća na pritisak elemenata za zidanje i maltera

2.1.1 Čvrstoća na pritisak elemenata za zidanje

Ispitivanje čvrstoće na pritisak elemenata za zidanje vršeno je u skladu sa standardom MEST 772-1:2011, a rezultati su dati u tabeli 1. Prikazani rezultati predstavljaju aritmetičku sredinu rezultata testiranja, dobijenih na tri testirana uzorka elemenata za zidanje.

Tabela 1. Rezultati ispitivanja čvrstoće na pritisak elementa za zidanje
Table 1. Results of strength test of masonry units on compression

	Šuplja blok opeka Hollow brick block	Blok opeka Brick block
Uzorak/ Sample:		
Dimenzije uzorka, [mm]: Dimensions of the masonry unit, [mm]:	250x120x65	250x190x190
Srednja vrijednost čvrstoće na pritisak, [MPa]: Average value of compressive strength, [MPa]:	6,11	6,51

2.1.2 Čvrstoća na pritisak maltera

Ispitivanje maltera sprovedeno je u skladu sa standardima: MEST EN 1015-2: 2009 (uzimanje i priprema uzoraka za ispitivanje) i MEST EN 1015-11: 2009 (određivanje čvrstoće na pritisak i savijanje). Rezultati ispitivanja su dati u tabeli 2.

380x190x190 mm). Only the results of tested walls made of hollow brick blocks and brick blocks will be presented in this paper.

The standards in the area of masonry structures allow that in the absence of specific experimental results, the characteristic strength of masonry walls on compression is determined based on analytical expressions in which figures the basic parameters: mean compressive strength of masonry units and mortar strength on compression. Therefore, these parameters are defined at the beginning of the research project.

2.1 Compressive strength of masonry units and mortar

2.1.1 Compressive strength of masonry units

The testing of the compressive strength of masonry units was carried out in accordance with MEST 772-1: 2011, and the results are given in table 1. The presented results represent arithmetic averages of tested results that were obtained on three tested samples of masonry units.

2.1.2 Compressive strength of mortar

The testing of mortars was conducted according to the following standards: MEST EN 1015-2: 2009 (sampling and preparation of samples for testing) and MEST EN 1015-11: 2009 (determination of compressive strength and tensile strength due to bending). The test results are given in table 2.

Tabela 2. Čvrstoća na pritisak maltera
Table 2. Compressive strength of mortar

Produžni malter/ Cement-lime mortar:	M1	M2	M3	M4
Odnos Vc:Vk:Vp Volume ratio between: cement, lime and sand	1 : 0,75 : 5	1 : 0,5 : 6	1 : 0,25 : 4,25	1 : 0,2 : 3
Srednja vrijednost čvrstoće na pritisak, [MPa]: Average value of compressive strength, [MPa]	11,60	8,20	14,40	23,90
Klasa maltera/ Class of mortar:	M10-1	M5	M10-2	M20

2.2 Određivanje čvrstoće na pritisak zidova i modula elastičnosti

Izvršena su testiranja s ciljem određivanja: čvrstoće na pritisak, modula elastičnosti, čvrstoće na smicanje i modula smicanja.

Za proračun i ispitivanje izabrana je kombinacija opeke/blokova s više vrsta maltera. Šuplja opeka kombinovana je s malterima klasa M5 i M10-2 (oznaka na zidovima PM2 i PM3), dok su zidovi od bloka opeke kombinovani s malterom klase M10-1, M10-2 i M20 (oznake na zidovima od blok opeke: IM1; IM3 i IM4).

2.2.1 Ispitivanje zidova na pritisak

Osnovni pokazatelj kvaliteta nearmiranog zidanog zida jeste karakteristična čvrstoća zida na pritisak, f_k . Karakteristična čvrstoća zida na pritisak f_k , jeste vrijednost čvrstoće zida, bez efekta spriječene deformacije, vitkosti ili ekscentriciteta opterećenja, za koju postoji propisana vjerovatnoća od 5% da ne bude dostignuta, u hipotetički neograničenoj seriji ispitivanja. Karakteristična čvrstoća zida zavisi od karaktera zida, odnosno postojanja podužne malterske spojnice u zidu, vrste i grupe elemenata od kojih je zid zidan, kao i od čvrstoće na pritisak elementa za zidanje i čvrstoće maltera na pritisak.

Ispitivanje čvrstoće na pritisak i modula elastičnosti zidanih zidova od blok opeke obavljeno je na petnaeset uzoraka zidova, prema standardu EN 1052-1:2011 – „Metode ispitivanje zidanih konstrukcija – Dio 1: Određivanje čvrstoće na pritisak”.

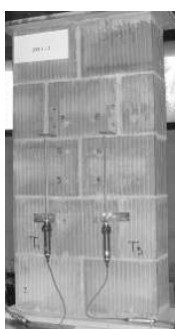
Testiranje na pritisak sprovedeno je na zidovima od:

- male opeke (dim. 25x12x6.5 cm), varirane dvije marke maltera, ukupno šest uzoraka;
- blok opeke (dim. 25x19x19 cm), varirane tri marke maltera, ukupno devet uzoraka.

Vrste ispitivanih uzoraka zidova vide se na slici 1 a).



(a) Vrste zidova od blok opeke
(a) Types of wall made of brick blocks



2.2 Determination of compressive strength and elasticity modulus of masonry walls

Testing was conducted to determine: compressive strength, elastic modulus, shears strength and shear modulus.

The combinations of bricks/blocks with multiple types of mortar have been chosen for the calculation and testing. The hollow brick blocks have been combined with mortar classes: M5 and M10-2 (marks on the walls PM2 and PM3), while the walls made of brick blocks have been combined with mortar classes: M10-1, M10-2 and M20 (marks on the walls made of brick blocks: IM1; IM3 and IM4).

2.2.1 Testing of the masonry walls on compression

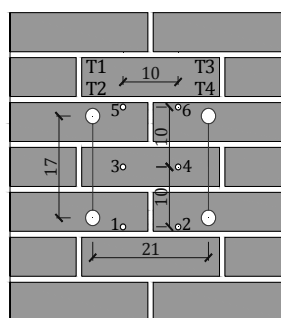
The main indicator of the quality of unreinforced masonry is characteristic strength of the wall on the compression, f_k . The characteristic strength of the wall on the compression f_k is the value of wall strength, without the effects of restraint deformation, slenderness or eccentricity of the load, for which there is a prescribed probability of 5% that is not achieved in a hypothetical unlimited series of testing. The characteristic strength of the wall depend on the character of the wall, respectively existence of longitudinal mortar joints in the wall, type and group of masonry units from which the wall is built, as well as the compressive strength of masonry units and strength of mortar on compression.

The testing of compressive strength and elasticity modulus has been performed on the 15 walls samples in accordance with the standard EN 1052-1: 2011 – “Test methods for masonry - Part 1: Determination of compressive strength”.

The testing of the walls samples on compression have been performed on the walls of:

- Small brick blocks (dim. 25x12x6.5 cm), three class of mortar were varied, total of 6 samples;
- Brick blocks (dim. 25x12x6.5 cm), three class of mortar were varied, total of 9 samples;

The types of walls that we tested can be seen in Figure 1 a).



(b) Šema mjernih mjesta
(b) Scheme of measurement points

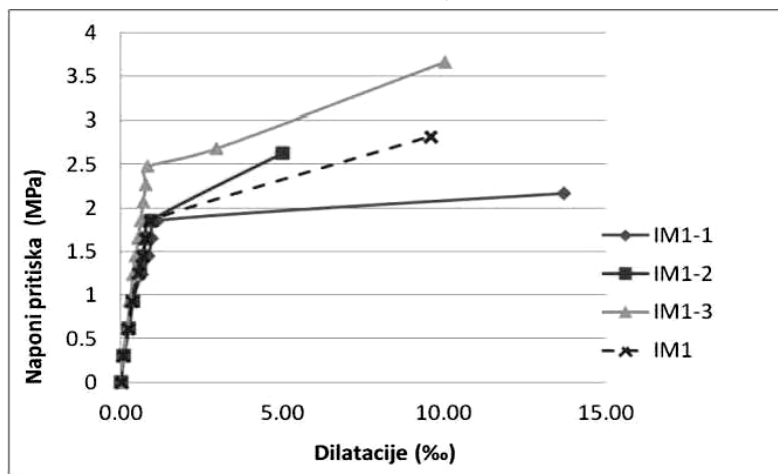
Slika 1. Ispitivanje zidova na pritisak
Figure 1. Testing of the walls on compression

Karakteristične čvrstoće na pritisak zidanih zidova eksperimentalno se određuju tako što se izrađuju najmanje po tri uzorka zidanih zidova sa istom vrstom elementa za zidanje i istom klasom maltera. Visina uzorka treba da bude najmanje pet puta veća od visine elementa za zidanje, kao što se vidi na slici 1(b). Uzorak se postavlja u presu i pažljivo centrira, s težnjom da se izbjegne ekcentričan unos ravnomjerno podijeljenog opterećenja. Sila na presi se ravnomjerno povećava do trenutka loma uzorka, koji uslijedi nakon oko 15–30 min. od početka testiranja uzorka. Uzorci su adekvatno opremljeni kako bi se mogla odrediti čvrstoća na pritisak i modul elastičnosti, a u skladu s tehničkim mogućnostima i opremom koju posjeduje laboratorija Građevinskog fakulteta u Podgorici. Za mjerenje vertikalnih dilatacija postavljeni su uređaji koji automatski mjere deformacije u zidovima (linear variable displacement transducers – LVDT). Po dva uređaja postavljena su na oba lica zida (slika 1), dakle, ukupno četiri.

Nakon izvršenog testiranja, sva mjerenja deformacija registrovana na četiri LVDT-a unesena su u program EXEL, gdje je izvršeno osrednjavanje izmjerenih deformacija s četiri mjerna mjesta: T1, T2, T3 i T4. Za svaki testirani zid nacrtan je grafikon zavisnosti osrednjenih dilatacija i napona pritiska, a zatim je nacrtana i kriva osrednjene dilatacije u tri uzorka zidova sa istom vrstom elemenata za zidanje i istom klasom maltera. Primjeri dijagrama dilatacije – naponi pritiska za tri zida uzorka od blok opeke, dimenzija 25x19x19 cm, koji su ozidani istom klasom maltera M10-1, koja je na uzorcima označena oznakom M1, dati su na slici 2.

The characteristic compressive strength of masonry walls are determined experimentally, so at least, three samples of masonry walls are made with the same type of masonry units and the same class of mortar. The height of the sample was at least five times higher than the height of masonry units, as shown in Figure 1b). The sample is placed in a press and carefully centres with aim to avoid eccentric intake due to evenly divided load. The compressive force is uniformly increased until the time of the sample fracture, which followed after about 15-30 minutes from the start of the testing. Samples were adequately equipped for determining the compressive strength and elasticity modulus in accordance with the technical capabilities and equipment owned by the laboratories of Faculty of Civil Engineering in Podgorica. Devices that automatically measure deformation in the walls samples, (linear variable displacement transducers - LVDT), were installed for the measurement of the vertical deformation. Two devices were placed on every face of the wall, 4 in total.

When the testing was finished, all the measuring deformation was registered in four LVDT's and entered in the program EXEL; afterwards, the measured strains with four measurement points: T1, T2, T3 and T4 were averaged. For each tested walls the graphs of averaged strains and compressive stresses are drawn, and then the curve of compressive strength depending on averaged strains in three walls samples (with the same type of masonry and mortar with the same class) is drawn, too. The examples of graphs relative deformations - compressive stresses are presented in figure 2. The graphs are obtained for three walls samples made of brick blocks, with dimensions 25x19x19 cm, which are built with the same mortar M10-1, which is marked as M1 in the samples.

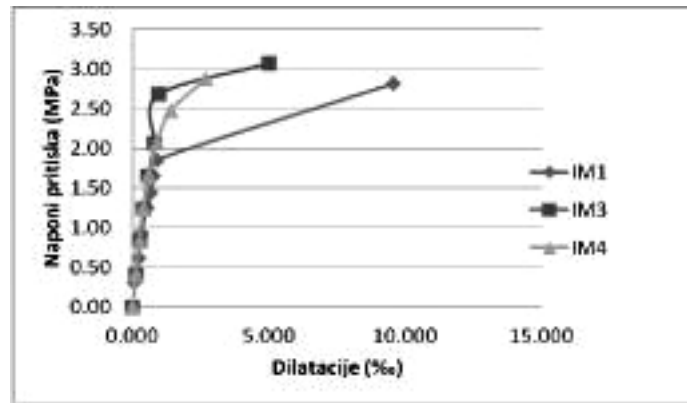


Slika 2. Dijagram dilatacije – naponi pritiska za zidove sa blok opekom, dimenzija 25x19x19 cm, u klasi maltera označenoj sa M1

Figure 2. Diagram strains-compressive stresses for walls made of brick blocks, dimensions 25x19x19 cm, in the mortar class marked as M1

Na slici 3 prikazani su dijagrami dilatacije – naponi pritiska za zidove zidane blok opekom, dimenzija 25x19x19 cm (označeni oznakom I na uzorcima) u tri različite klase maltera (koje su date u tabeli 2, i označene oznakama: M1, M3 i M4 na uzorcima zidova).

On the figure 3 strains-compressive stresses for walls made of brick blocks dimensions 25x19x19 cm (marked as label I in the walls samples) in three different mortar classes (given in the table 2, and marked as labels: M1, M3 and M4 in the walls samples).



Slika 3. Dijagram dilatacije – naponi pritiska za zidove od blok opeke, varirane tri klase maltera
 Figure 3. Diagram strains-compressive stresses for walls made of brick blocks, three mortar classes have been varied

2.3 Uporedni prikaz eksperimentalnih i analitičkih rezultata

Radi provjere, kako propisi definišu, karakteristične čvrstoće zidanih zidova na pritisak i module elastičnosti analizirani su: važeći jugoslovenski standard PZZZ'91, evropski standard EN 1996-1-1:2005 i američki standardi ASTM E447 i ASTM C 270. Uporedni prikaz karakterističnih čvrstoća na pritisak, sračunatih analitički i dobijenih eksperimentalno, dat je u tabeli 3.

2.3 Parallel presentation of experimental and analytical results

The characteristic compressive strength and elasticity modulus are analysed in accordance with: current Yugoslavian standards PZZZ'91, European standard EN 1996-1-1:2005 and American standards ASTM E447 and ASTM C 270 aiming to compare the calculated values. Comparative review of the characteristic compressive strength of the walls that are calculated analytically and obtained by experimental testing is given in table 3.

Tabela 3. Karakteristične čvrstoće na pritisak zidova, dobijene analitički i eksperimentalno
 Table 3. Characteristic compressive strength of the walls obtained analytically and experimentally

Oznake uzoraka Labels of the samples	Karakteristična čvrstoća zidova na pitisak, f_k [MPa] Characteristic compressive strengths of walls, f_k [MPa]				
	EC6	ACI	YU	$\Sigma f_i/3$	$f_{k \text{ eksp.}}$
PM2	2,12	3,98	2,54	2,85	2,37
PM3	2,51	4,29	2,92	2,33	1,94
IM1	2,97	4,06	3,72	2,84	2,18
IM3	3,17	4,39	3,92	3,10	2,58
IM4	3,69	4,71	4,45	2,89	2,41

Vrijednosti karakteristične čvrstoće na pritisak, dobijene anlitički na osnovu jednačina koje se daju u našim važećim propisima, evropskim i američkim standardima, veće su od vrijednosti karakterističnih čvrstoća testiranih zidova. Eksperimentalno utvrđene vrijednosti modula elastičnosti na ispitivanim zidovima veće su nego one koje se daju u navedenim propisima i standardima. Karakteristične čvrstoće na pritisak zidanih zidova, definisane prema američkim standardima, znatno su veće u odnosu na karakteristične čvrstoće na pritisak, definisane u skladu sa evropskim i trenutno važećim propisima. Ovo može biti posljedica razlike u svojstvima materijala za zidanje, koji se koriste u SAD, a kojima je korišćena formula prilagođena.

Eksperimentalna istraživanja sprovedena su na relativno malom broju uzoraka zidova, na zidovima zidanim sa elementima male čvrstoće na pritisak i u malterima visoke klase, te rezultati sprovedenih istraživanja nisu dovoljni za postavljanje jednačine za određivanje karakteristične čvrstoće na pritisak zidanih

The values of characteristic compressive strengths that are obtained by analytical approach are in accordance with equations in our current regulations, Europeans standards and American standards that are bigger than the values obtained on the tested walls. Experimentally determined values of elasticity modules on tested walls are bigger than those provided in mentioned regulations and standards. Characteristic compressive strengths of masonry walls that are defined in accordance with American standards are bigger than those in Europeans standards and our current regulations. This may be due to differences between material properties for building which are used in USA, and for which is used formulas adapted.

Experimental researches are conducted on relatively small number of walls samples, on the masonry walls made of masonry units with small compressive strengths and in the mortars with high classes, so the results of the conducted researches are not enough for setting equations of compressive strengths of walls made of

zidova od blok opeke. Analitički izrazi za određivanje čvrstoće na pritisak zidanih zidova, dati u standardu EN 1996-1-1:2005, daju vrijednosti najbliže vrijednostima koje su utvrđene eksperimentom.

Usporedni prikaz modula elastičnosti, sračunatih analitički i dobijenih eksperimentalno, dat je u tabeli 4.

Tabela 4. Moduli elastičnosti dobijeni analitički i eksperimentalno
Table 4. Elasticity modulus obtained analytically and experimentally

Oznake uzoraka Labels of the samples	Modul elastičnosti E, [GPa] Elasticity modulus E, [GPa]			
	EC6	ACI	YU	E _{eksp.}
PM2	2,12	2,79	2,54	2,63
PM3	2,51	3,00	2,92	5,40
IM1	2,97	2,84	3,72	2,88
IM3	3,17	3,07	3,92	3,07
IM4	3,69	3,30	4,45	3,19

Modul elastičnosti, dobijen eksperimentalno za uzorke zidova od blok opeke (oznaka I), iznosi oko $1300x_{fk}$, što je više od propisanog načina definisanja modula elastičnosti, koji iznosi $1000x_{fk}$.

Malter u spojnicaama ne utiče samo na čvrstoću zida na pritisak, već i na ukupni mehanizam loma zida. Upotrebom maltera veće čvrstoće, u kombinaciji sa elementima za zidanje male čvrstoće na pritisak, smanjuje se nosivost zidanog zida, jer zid postaje krhiji. Preporuka je – izbjegavati zidanje zidova sa elementima male čvrstoće na pritisak u malteru visoke klase.

Na osnovu do sada analiziranih rezultata eksperimenta, opaža se da povećana količina kreča u recepturi za malter popravlja duktilnost zida. Ovaj stav treba potvrditi i dodatnim analizama.

Značajan uticaj na ponašanje zida i mehanizam loma tokom eksperimenta ima kvalitet izrade zidova uzoraka. Na čvrstoću zida na pritisak utiče i ispunjenost horizontalnih i vertikalnih spojnica malterom. Preporuka je ugrađivanje maltera konstantne debljine duž čitave horizontalne spojnice, kako bi naprezanje unutar zida bilo što ravnomjernije.

2.4 Određivanje čvrstoće na smicanje i modula smicanja

Seizmičke sile koje djeluju na zidane konstrukcije s krutom međuspratnom konstrukcijom, u trenutku loma izazivaju smicanje koje karakterišu dijagonalne pukotine u zidovima u prizemlju. Ovakav mehanizam loma u velikom broju slučajeva određuje seizmičku otpornost zidanih konstrukcija, a zbog uzroka nastanka pukotina, zove se i rušenje usljed dijagonalnog zatezanja. Na slici 4 prikazan je karakteristični mehanizam loma dijagonalnim zatezanjem, koji je registrovan na jednom objektu u Budvi nakon dejstva razornog zemljotresa 1979. godine.

Kod mehanizma smicanjem, koji karakteriše nastanak kosih – dijagonalnih pukotina, pukotine su posljedica glavnih zatežućih napona koji nastaju u ravni zida, usljed kombinovanog djelovanja opterećenja na pritisak i horizontalnog opterećenja u ravni zida koje prouzrokuje smicanje. U trenutku kada glavni napon zatezanja dostigne vrijednost, koja se zove „čvrstoća

brick blocks. Analytical expressions for determinations of characteristic compressive strengths of walls, given in standards EN 1996-1-1:2005, provide values that are nearest with experimentally obtained values.

Comparative view of elasticity modules analytically and experimentally obtained is given in the table 4.

Modulus obtained experimentally for samples of walls of brick blocks (mark I) is about $1300x_{fk}$, what is higher than the elasticity modulus defined in the regulations, which is $1000x_{fk}$.

Mortar in the layers and heads joints has influenced both compressive strength of the wall and failure mechanism of the wall as well. The strengths of the walls are decreased if using mortar of higher strength in combination with masonry units with small compressive strength because the walls become brittle.

On the based experimental results that are obtained so far it can be concluded that bigger quantity of lime in the mixture of mortar improves ductility of the wall. This attitude needs to be confirmed and additionally analyzed.

The important influence on the behaviour and failure mechanism of wall during the experiment has quality of construction of the wall sample. The filling of horizontal and head joints with mortar has influenced the compressive strength of the wall. The recommendation is embedding mortar with constant thickness along the horizontal joints, which will distribute the stress inside the wall evenly.

2.4 Determination of shear strength and shear modulus

The seismic forces acting on masonry structures with rigid floor structures in the moment of structure failure cause shear which is presented by diagonal cracks on the walls on the ground floor. This failure mechanism in great number of cases determinate seismic resistance of masonry structures, and it causes cracks called demolition due to diagonal tension. The characteristics of failure mechanism with diagonal tension are presented in figure 4. It was registered on one building in Budva after the destructive earthquake in 1979.

In the shear mechanism, which is characterized by the formation of oblique - diagonal cracks, the cracks are the result of the main tensile stresses which occur in the face of the wall and they are caused by shear due to the combined effects of loading on the compression and horizontal loads that act in the plane of the wall. In the moment when main tension stress reaches the value

zida na zatezanje", u zidu nastaju pukotine u dijagonalnom pravcu [6].

which is called the "strength of the wall in tension" the wall cracks in a diagonal direction, [6].



Slika 4. Budva, 1979: rušenje zidova od opeke na smicanje, [6]
Figure 4. Budva, 1979: Brick wall failure due to shear, [6]

Evropski standard za projektovanje zidanih konstrukcija, EN 1996-1-1:2005, ne prepoznaje ovaj mehanizam loma zidanih zidova i ne definiše „čvrstoću zida na zatezanje“. Brojni zidani objekti projektovani su i izvedeni u skladu s još uvijek važećim jugoslovenskim propisom za projektovanje konstrukcija u seizmički aktivnim područjima PIOVS 81, u kojem se smicanje definiše preko graničnog glavnog napona zatezanja. U tabeli koja se nalazi u propisu PIOVS 81 nema vrijednosti glavnih napona zatezanja za neke od elemenata za zidanje koji su ispitivani u okviru naučnoistraživačkog projekta SROKO.

Granični glavni napon zatezanja zidanih zidova od blok opeke, odnosno čvrstoća na smicanje, određena je nakon testiranja uzoraka apliciranjem sile pritiska po dijagonali, u skladu sa američkim standardima, [1].

Ukupno je testirano trinaest uzoraka zidova od blok opeke, i to od:

- male opeke, dimenzija 25x12x6.5 cm, ukupno četiri uzorka;
- blok opeke, dimenzija 25x19x19 cm, varirane tri marke maltera, ukupno devet uzoraka;

Ispitivanje zidova apliciranjem sile pritiska po dijagonali, prikazano je na slici 5.

The European standard for the design of masonry structures, EN 1996-1-1:2005, fails to recognize this failure mechanism of masonry walls and does not define the "strength of the wall in tension". Numerous masonry buildings are designed and constructed in accordance with the current Yugoslav regulations for the design of structures in seismic areas, PIOVS'81, in which shear is defined through the limit of the main tensile stress. In the table which is located in regulation PIOVS 81 there is no value of main tension stresses for some masonry units which were tested within the research project SROKO.

The limit of the main tensile stress in the masonry walls made of brick blocks, or shear strengths have been determined after testing the samples applying compressive force on the diagonal, in accordance with American standards, [1].

A total of 13 samples of walls were tested, and that the walls of:

- Small brick blocks (dim. 25x12x6.5 cm), total of 4 samples;
- Brick blocks (dim. 25x12x6.5 cm), three class of mortar were varied, total of 9 samples.

Testing walls when applying compressive forces on the diagonal of the samples are shown in figure 2.



Slika 5. Ispitivanje zidova na smicanje usljed dijagonalnog zatezanja
Figure 5. Walls tested on the shear due to diagonal tension failure

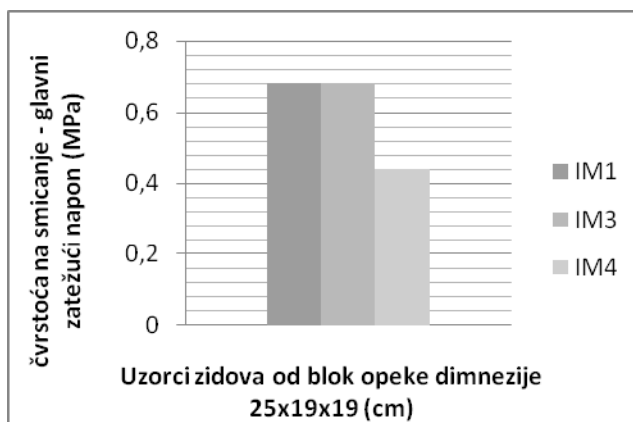
Uzorci su bili opremljeni sa po četiri mjerna instrumenta za digitalno očitavanje deformacija (linear variable displacement transducers, LVDT), koji su postavljeni unakrst po dva, sa obje strane zida. Nakon svakog apliciranja sile pritiska po dijagonali, očitavane su deformacije na horizontalno i vertikalno postavljenim mjernim uređajima. Rezultati su obrađeni u skladu sa američkim standardom ASTM E 519-02.

The samples have been equipped with four measurement instrument for digital deformation registered (linear variable displacement transducers, LVDT), which have been set perpendicular, one to another, on both faces of the wall. After each application of compressive force on the diagonal of sample deformations have been read on both horizontally and vertically setting measurement devices. The results have

U tabeli 5 prikazane su vrijednosti čvrstoće na smicanje, a na slici 6 dat je dijagram dostignutih čvrstoća na smicanje usljed dijagonalnog zatezanja za uzorke zidova od blok opeke, koji su ozidani u tri različite klase maltera.

Tabela 5. Čvrstoće na smicanje
Table 5. Shear strengths

Oznaka uzorka Labels of the samples	Sila loma Breaking force	τ_i
	kN	MPa
IM1	72.5	0.68
IM3	70.8	0.68
IM4	45.8	0.44



Slika 6. Dijagram dostignutih čvrstoća na smicanje, usljed dijagonalnog zatezanja za uzorke zidova od blok opeke u tri klase maltera

Figure 6. Diagram of achieved shear strength due to diagonal tension failure for wall samples made of brick block in three mortar classes

Na osnovu prezentiranih rezultata, generalno se može zaključiti da povećanje marke maltera nije uvećalo čvrstoću zidova na smicanje, odnosno vrijednosti glavnih napona zatezanja. Na uzorcima zidova od blok opeke registrovan je pad vrijednosti glavnih napona zatezanja s porastom marke maltera. Ovaj pad čvrstoće na smicanje treba uzeti s rezervom, jer je u jednom uzorku zida usljed lošeg zidanja unijeta ekcentrična sila pritiska, te je stoga došlo i do podbačaja izmjerenih vrijednosti sila loma.

3 OJAČAVANJE ZIDANIH ZIDOVA OD BLOK OPEKE I BETONSKOG BLOKA FRCM KOMPOZITIMA

3.1 Opšte karakteristike FRCM kompozita

Prvu generaciju materijala za spoljašnje ojačavanje betonskih i zidanih konstrukcija predstavljali su FRP kompoziti (Fibre Reinforced Plastic) koje sačinjava polimerna matrica armirana vlaknima. Ovaj materijal svoju širu primjenu našao je u ojačanju betonskih konstrukcija [5].

Druga generacija komozitnih sistema za spoljašnje ojačanje betonskih i zidanih konstrukcija jesu TRC (Textile Reinforced Concrete) kompoziti. Naaman, [3], definisao ih je kao: „Beton kod kojih je matrica na bazi cementa armirana sa više slojeva 2D ili 3D tekstila, pri tome je najmanje jedan sloj tekstila postavljen na dvijema spoljšanjim stranama konstruktivnih elemenata. Tekstil može biti napravljen od metala, sintetike, polimera, organskih ili nekih drugih odgovarajućih materijala. Finoća cementne matrice i njen sastav treba da budu kompatibilni s tekstilnom armaturom koju treba da obuhvati.”

been processed in accordance with American standard ASTM E 519-02.

In the table 5 the results of shear strengths are presented, and in the figure 6 there is a diagram of achieved shear strength due to diagonal tension of wall samples made of brick blocks which are built in three mortar classes.

On the bases of presented results generally it can be concluded that the increase of mortar class has not increased the strength of shear walls, respectively values of main tension stresses. The decrease of the values of main tension stresses with the increase class of mortar has been registered on the samples of walls made of brick blocks. This decrease in shear strength should be taken with caution because in one sample of the wall the force was entered with eccentric due to poor brickwork, and therefore small breaking force values has been measured.

3 STRENGTHENING OF MASONRY WALLS MADE OF BRICK BLOCKS WITH FRCM COMPOSITES

3.1 General properties of FRCM composites

FRCM composites (Fibre Reinforced Plastic) presented the first generation of materials for external strengthening of the concrete and masonry walls. FRCM composites consist of polymer matrix and reinforced fibres. These materials are widespread used and found in strengthening of concrete structures, [5].

The second generation of composites for external strengthening of the concrete and masonry walls are TRC (Textile Reinforced Concrete) composites. Naaman, [3], it is defined as: „Concrete in which the matrix-based cement reinforced with multiple layers of 2D or 3D textiles, wherein at least one layer of textile is placed on two outbound sides of the structural elements. Textiles can be made from metal, synthetic materials, polymers, organic or other suitable materials. The fineness of the cement matrix and its composition should be compatible with the textile reinforcement which should be included“.

FRCM kompozit (Fabric-Reinforced Cementitious Matrix) jeste jedna od podvrsta TRC kompozita, kod kojih se za armaturu koriste „otvorene” tkanine koje se prilikom ojačavanja najčešće postavljaju u dva ortogonalna pravca. FRCM kompozitni materijal sastoji se od matrice na bazi cementa (cement based matrix) i jednog ili više slojeva „otvorene” mreže. Mreža je izrađena od vlakana od: alkalno otpornog stakla, aramidnih, karbonskih, PBO (polyparaphenylene benzobisoxazole PBO) ili hibridnih struktura. Mreža-tkanina „otvorene” strukture omogućava veću dodirnu površinu vlakana i matrice, i tako obezbeđuje bolje zajedničko ponašanje materijala u kompozitnom sistemu. Veličina otvora mreže ne bi trebalo da bude veća od 2 cm, [2].

Vlakna su komponenta kompozita čija je uloga da izvrše ojačanje sistema i preuzmu sile zatezanja nakon pojave prslina u matrici. Matrica ima ulogu da izvrši distribuciju sila, uzrokovanih spoljašnjim ili unutrašnjim dejstvima, na vlakna, i istovremeno da poveže FRCM kompozit sa elementom koji se ojačava. U ovom slučaju, sa zidanim zidovima od blok opeke.

Istraživači navode da bi u slučaju „idealne” veze između cementne matrice i armature, dijagram deformacije-napon, pri ispitivanju uzoraka kompozita na zatezanje, izgledao kao na slici 7 (a). U stanju I, bez prslina, kompozit ostaje elastičan i ima krutost koja odgovara krutosti matrice. Nakon formiranja prve makroprslina, opterećenje se prenosi na vlakna i ona prihvataju opterećenje do dostizanja čvrstoće na zatezanje. Ovakav mehanizam loma je moguć ako je obezbijeđeno da vlakna odnosno tekstil ne „proklizavaju” pri testu na zatezanje.

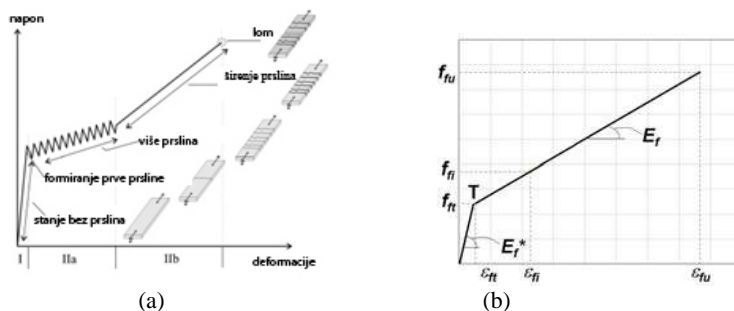
Ispitivanje uzoraka obloge, laminata, vrši se prema američkom standardu AC434-13 Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems. U radu [1] prikazano je testiranje laminata od različitih FRCM obloga i metod određivanja radnog bilinearnog dijagrama, slika 7 (b).

FRCM composites are one of subtypes of TRC composites where “open” textile is used as reinforcement. It is set in two orthogonal directions during the strengthening. FRCM composites are consisting of cement based matrix and one or more layers “open” mesh. Mesh is built from fibre: alkali-resistant glass, aramid, carbon, PBO (polyparaphenylene benzobisoxazole PBO) or hybrid structures. Mesh-textile with “open” structures allows larger contact areas of fibres and matrix, and thus, it provides better common behaviour of the material in the composite system. Size meshes should not be larger than 2 cm, [2].

Fibres are components of composites with the role of strengthening the system and taking tension force after the appearance of cracks in the matrix. The matrix is distributing the force due to external or internal action on the fibres and at the same time to connect FRCM composite with elements that are strengthened, in this case with masonry walls made of brick blocks.

The researchers say that in case of “ideal” connection between cement base matrix and reinforced, when testing composite samples on the tension, diagram strain-stresses occur as one in the figure 7(a). In the stage I, without cracks, composites stay elastic and have a stiffness corresponding to the stiffness of matrix. After the formation of the first macro crack load is transferred to the fibres and they accept the load on reaching tensile strength. This failure mechanism is possible if it is ensured that the fibres and textiles are not “slipping” during the tests in tension.

The testing of the covering samples, laminates, is done in accordance with American standards, „AC434-13 Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fabric-Reinforced Cementations Matrix (FRCM) Composite Systems. In the paper [1] testing of the different type of FRCM coverings and method for determination of working bilinear diagram is presented, figure 7 (b).



Slika 7. (a) Tipičan odgovor TRC kompozita na testu na zatezanje [2];
(b) Idealizovani radni dijagram FRCM laminata, [1]

Figure 7. (a) Typical response to TRC composite on tensile test [2];
(b) The idealized work chart of FRCM laminate, [1]

FRCM sistemi za vanjsko ojačanje i sanaciju objekata relativno su novi materijali, čija istraživanja su trenutno aktuelna. U radovima, [2], [3], [7], ističe se očekivanje da će ovi sistemi prevazići neka od ograničenja FRP sistema, posebno u vidu boljeg ponašanja u vlažnim i hemijski agresivnim sredinama. Studije su za sada dokazale trajnost alkalno otpornih staklenih vlakana u cementnim matricama.

FRCM systems for external strengthening and recovering of buildings are relatively new materials, and its researching is current nowadays. In the papers [2], [3], [7], the expectation is pointed out that these systems overcome some of the limitations of the FRP system especially in the form of better behaviour in humid and chemically aggressive environments. Studies have proven the durability of alkali-resistant glass fibres in the

FRCM sistemi imaju bolje ponašanje pri dejstvu povišenih temperatura, vlage, i ultraljubičastog zračenja, nego FRP kompozitni sistemi. Za razliku od FRP sistema, FRCM sistemi su nezapaljivi. Zbog njihovih nezapaljivih i netoksičnih svojstava, FRCM sistemi su dobar izbor za ojačanje konstruktivnih elemenata kod kojih je potrebna otpornost na visoke temperature. Mehaničke osobine matrice na bazi polimera se drastično degradiraju pri visokim temperaturama, što kod FRCM sistema nije slučaj.

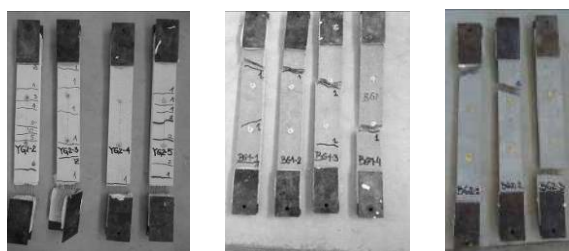
Polimerne FRP matrice prilikom sanacije elemenata djeluju kao parna brana. Vлага ostaje zarobljena u zidovima, što može da prouzrokuje pad nosivosti materijala. FRCM cementna matrica je više kompatibilna s podlogom od polimerne matrice. Poroznost i paropropusnost cementne matrice slične su zidanoj podlozi, pa se vлага ne zadržava u zidovima.

3.2 Izbor FRCM sistema kompozita za vanjsko ojačavanje zidova

S ciljem odabira FRCM kompozitnog sistema koji se koristi kao obloga za ojačanje zidova, koji su prethodno ispitani na dijagonalni pritisak, sprovedena su ispitivanja različitih vrsta FRCM kompozita s različitom matricom i različitom vrstom armature za ojačanje.

Testirano je ukupno 60 uzoraka, u dvije etape testiranja. U prvoj etapi testiranja na zatezanje ispitano je sedam serija uzoraka laminata, a u drugoj etapi testiranja ispitane su tri serije uzoraka laminata.

Serijski označava određeni FRCM sistem, odnosno kombinaciju određene vrste matrice i određene vrste armaturnih vlakana. Prva etapa testiranja, od sedam serija, poslužila je kao osnova za definisanje svojstava matrice i prepoznavanje međusobne interakcije matrice i mrežica u kompozitu. Nakon analize rezultata, odabrane su kombinacije matrice i mrežica, odnosno FRCM kompozita, koje su korišćene kao obloga za ojačanje isprskalih zidova. Neki od ispitanih laminata prikazani su na slici 8.



Slika 8. Ispitivanje FRCM laminata i prikaz karakterističnog loma na zatezanje (označene su prsline)
Figure 8. Testing of FRCM coupons and representative failure of tensile (crack lines are marked)

U prvoj etapi ispitivanja, kao matrica su korišćeni materijali koji se kao suva mješavina mogu kupiti na tržištu: Betonprotekt RT i Ytong-ov tankoslojni malter.

Ispitano je sedam vrsta FRCM sistema na zatezanje. Laminati su bili kombinacija matrice od Betonprotekt RT (oznaka B) ili Ytong-ovog tankoslojnog maltera (oznaka Y). Matrice su armirane sa staklenom

cement matrix, now.

FRCM systems have better behaviour at the effect of elevated temperature, humidity, and ultraviolet radiation than FRP composite systems. Unlike the FRP system FRCM systems are non-flammable. FRCM systems are a good choice for the reinforcement of the structural elements in which the resistance to high temperatures is required because of their non-toxic and non-flammable properties. The mechanical properties of the matrix based on polymer drastically degrade at high temperatures, which is not the case in FRCM system.

FRP polymer matrix during the repair of elements acts as a vapour barrier. Humidity remains trapped in the walls which may cause a decline in capacity of the material. Porosity and water vapour permeability of cementations matrix are similar to brick surface, and therefore the moisture is not retained in the walls.

3.2 Selection of FRCM composites system for external strengthening of the walls

Investigations of different FRCM composites types, with different matrix and different reinforcement types of wall strengthening are obtained in order to select FRCM composite system which is used as a lining for strengthening of cracked walls. Before strengthening the walls were previously tested for the diagonal compression.

The total of 60 samples has been tested in two stages of testing. Seven series of laminates samples were tested on the tension in the first stage of testing. In the second testing stage three series of laminates samples were tested. Series marks the specific FRCM system, a combination of certain type of matrix and certain reinforcing fibres type. The first stage of testing, from seven samples, served as the basis for defining the properties of the matrix and identification of the mutual interaction between the matrix and mesh in the composite. After analyzing the results it has been selected combinations of matrix and mesh for FRCM composites which have been used as a lining for strengthening cracked walls, later. Some of the tested laminates are shown in Figure 8.

Betonprotekt RT and Ytong's thin mortar have been used in the first stage of testing. These materials can be easily purchased on the market and can be used as a dry mix.

The seven types of FRCM system have been examined on tension. The laminates were combination of matrix from Betonprotekt RT (mark B) or Ytong's thin

mrežicom, 125 gr/m² (oznaka G) ili čeličnom mrežicom dimenzija otvora 10mm x 10mm (oznaka C). FRCM sistemi su kombinovani s jednim slojem mrežica ili s dva sloja mrežica. Broj slojeva mrežice u FRCM sistemu označen je brojem iza slovne oznake.

U prvoj etapi testirane su sljedeće vrste FRCM kompozitnih sistema:

- YG1 - Ytong tankoslojni malter s jednim slojem staklene mrežice;
- YG2 - Ytong tankoslojni malter s dva sloja staklene mrežice;
- BG1 - Betonprotekt RT s jednim slojem staklene mrežice;
- BG2 - Betonprotekt RT s dva sloja staklene mrežice;
- BC1 - Betonprotekt RT s jednim slojem čelične mrežice;
- BC2 - Betonprotekt RT s dva sloja čelične mrežice;
- BCG2 - Betonprotekt RT s jednim slojem čelične i jednim slojem staklene mrežice.

3.2.1 Ispitivanje matrice u prvoj etapi testiranja FRCM sistema

Ispitivanje matrice od Betonprotekt RT i Ytong-ovog tankoslojnog maltera, na savijanje i pritisak, sprovedeno je u skladu sa standardima: EN 1015-2: 2009 i EN 1015-11:2009. Ustanovljeno je da Betonprotekt RT ima čvrstoću na zatezanje usljed savijanja 7.1 MPa i čvrstoću na pritisak od 43.2 MPa, a Ytong-ov tankoslojni malter ima čvrstoću na zatezanje usljed savijanja 1.8 MPa i čvrstoću na pritisak od 4.8 MPa.

3.3 Ispitivanje uzoraka laminata u prvoj etapi testiranja FRCM sistema

Prema američkom standardu AC434-13, [1], definisanje mehaničkih karakteristika FRCM sistema vrši se na minimum pet pravougaonih uzoraka obloge, dobijenih rezanjem panela od određenog FRCM kompozitnog sistema. U toku ovog testiranja, ispitano je po šest uzoraka u svakoj seriji, probni uzorak na kojem je određen red veličine sile loma na zatezanje i po pet uzoraka-laminata na kojima su tokom apliciranja sile zatezanja registrovane deformacije u sredini uzorka.

Na slici 9 prikazana je izrada panela od određenog FRCM sistema, rezanje laminata i ispitivanje laminata na zatezanje.



Slika 9. Testiranje jedne vrste FRCM sistema: izrada panela, rezanje, ispitivanje na zatezanje
Figure 9. Testing one FRCM system type: production of panels, cutting, testing on tension

mortar (mark Y). Matrix have been reinforced by fibre glass mesh, 125 gr/m² (mark G) or steel mesh, dimensions of openings 10mm x 10 mm (mark C). FRCM systems are combined with one or two mesh layers. The number of mesh layers in the FRCM system is marked by the number after the letter labels.

The following types of FRCM composite systems are tested in the first stage of testing:

- YG1 - Ytong's thin mortar with one fibreglass mesh layer;
- YG2 - Ytong's thin mortar with two fibreglass mesh layer;
- BG1 - Betonprotekt RT with one fibreglass mesh layer;
- BG2 - Betonprotekt RT with two fibreglass mesh layer;
- BC1 - Betonprotekt RT with one steel mesh layer;
- BC2 - Betonprotekt RT with two steel mesh layer;
- BCG2 - Betonprotekt RT with one steel mesh layer and one glass mesh layer.

3.2.1 Testing the matrix in the first stage of FRCM system testing

Matrixes made of Betonprotekt RT and Ytong's thin mortar were tested on the bending and compression in accordance with standards: EN 1015-2: 2009 and EN 1015-11:2009. It was found that Betonprotekt RT has tensile strength due to bending of 7.1 MPa and compressive strength from 43.2 MPa, but Ytong's thin mortar has tensile strength due to bending of 1.8 MPa and compressive strength from 4.8 MPa.

3.3 Testing the laminates samples in the first stage of FRCM system testing

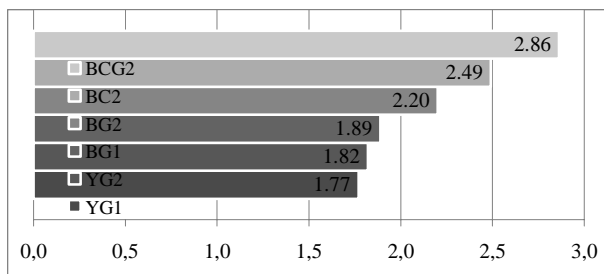
According to the American standards AC434-13, [1], definition of mechanical properties of FRCM system are done on minimal five rectangular laminates coupons that are obtained by cutting the panel from specific FRCM composite system.

The six coupons in each series were examined during the test; one sample was used to determine the magnitude of fracture strength in tension and five samples were used for registration of strains in the middle zone of the sample while the tension was applied.

Figure 9 shows the production of panels from specific FRCM system type, cutting laminate and testing laminate on tension.

3.4 Čvrstoća na zatezanje različitih FRCM sistema ispitanih u prvoj etapi testiranja

Nakon ispitivanja sedam serija laminata, sa po šest uzoraka u seriji, sračunate su srednje vrijednosti napona zatezanja u pet uzoraka laminata određenog FRCM sistema, a njihove vrijednosti prikazane su na slici 10.



Slika 10. Naponi zatezanja za različite vrste FRCM kompozita, (MPa)
Figure 10. Tensile stresses for various FRCM composites types, (MPa)

Nakon ispitivanja prve serije FRCM kompozitnih sistema, ustanovljeno je sljedeće:

- Kod uzorka koji su kao matricu imali Ytong-ov tankoslojni malter ostvaruje se dobra veza mrežice i matrice, ali se dostižu male čvrstoće na zatezanje. Lomu uzorka sa Ytong matricom prethodi klizanje mrežice;
- Kod uzorka s matricom od Betonprotekt-a RT lom je nenajavljen, krt i iznenadan;
- Staklena mrežica sa oznakom težine od 125 g/m² nije dobar izbor, jer ima nedovoljnu čvrstoću na zatezanje, te je neophodno koristiti jaču mrežicu u više redova. Stoga su uzorci zidova ojačani glas mrežicom težine od 160 g/m²;
- Čelična mrežica zbog svoje strukture klizi između slojeva matrice, te nije u stanju prihvatiti opterećenje nakon pojave prve pukotine. Ugradnja ove mreže dosta je teža nego rad sa staklenom mrežicom, te se od daljeg korišćenja ove vrste armature odustalo;
- Nameće se potreba izrade matrice od materijala koji će imati veću prionljivost s mrežicom, a čvrstoću na pritisak i zatezanje manju od Betonprotekt RT.

3.5 Čvrstoća na zatezanje različitih FRCM sistema ispitanih u drugoj etapi testiranja

Ispitivanja FRCM sistema sprovedena u prvoj etapi testiranja ukazala su nam na značaj matrice za pravilno funkcionisanje, kvalitetno prijanjanje i adekvatan mehanizam loma FRCM sistema. Matrice od Betonprotekt RT i Ytong-ovog tankoslojnog maltera nisu sasvim odgovarajuća matrica za FRCM kompozitne sisteme za vanjsko ojačanje zidanih zidova.

I pored uočenih nedostataka Betonprotekt RT, odlučeno je da se jedan broj uzoraka isprskalih zidova

3.4 Tensile Strength of various FRCM systems examined in the first stage of testing

After testing seven series laminates, with six samples in the series, the mean tensile stresses have been calculated in five samples of laminate from specific FRCM system types and their values are presented in the figure 10.

After testing the first series of FRCM composite system revealed the following:

- For samples with matrix from Ytong's thin mortar the good connection between mesh and matrix are achieved, but reached the small tensile strength. Fracture of the samples with Ytong's matrix preceded the sliding of the mesh;
- For samples with matrix made of Betonprotekt a RT fracture was not announced; it was brittle and sudden;
- The fibreglass mesh, with mark of weight from 125 g/m² is not a good choice because the mesh has insufficient strength to tension, and it is necessary to use a stronger mesh in more layers. Therefore the walls samples have been strengthened by fibreglass meshes which weight is 160 g/m²;
- The steel mesh sliding was between layers of matrix because of their structure, and it was not able to accept the load after the appearance of the first cracks. Installation of this mesh is much more difficult than working with fibreglass mesh, and further use of these reinforcement types is abandoned;
- There is obviously a need to prepare a matrix of materials with greater adhesion to the mesh, and the compressive and tension strength less than Betonprotekt RT;

3.5 Tensile strength of various FARM systems types examined in the second stage of testing

Testing of FRCM system conducted in the first phase of testing showed the importance of the matrix for proper functioning, quality adhesion and adequate fracture mechanism of FRCM system. Matrix from Betonprotekt RT and Ytong's thin mortar are inadequate matrix for FRCM composites systems for external strengthening of masonry walls.

Despite the shortcomings observed on the Betonprotekt RT, it was decided that one number of cracked walls samples should be strengthened by

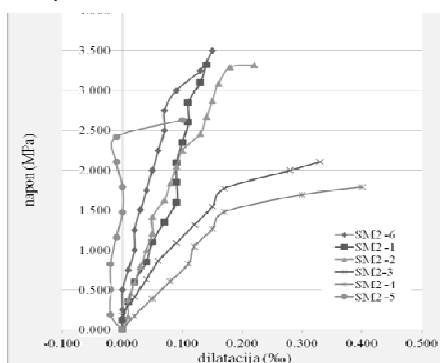
ojačava i matricom od Betonprotekta RT, jer je ovo materijal koji se lako nalazi na tržištu kao gotova suva mješavina. Prilikom ispitivanja matrice od Betonprotekta RT, konstatovana je zapreminska težina od 2149 kg/m^3 , čvrstoća na zatezanje usljed savijanja 6.5 MPa i srednja čvrstoća na pritisak od 50.8 MPa .

S ciljem uklanjanja nedostataka koji su uočeni u matricama od Betonprotekta RT i Ytong tankoslojnoj maltera, pristupilo se testiranju više serija malterskih mješavina radi pronalazjenja adekvatne recepture za novu matricu.

Nova matrica, izgrađena od maltera dobijenog po sopstvenoj recepturi, označena je kao SM matrica, a sastoji se od: cementa, hidratisanog kreča, silikatne prašine, elektrofilterskog pepela, drobljene opeke, fino granulisanog pijeska (frakcija manja od 3mm) i vode.

Nakon ispitivanja uzoraka SM maltera, konstatovana je zapreminska težina od 1986 kg/m^3 , čvrstoća na zatezanje usljed savijanja 5.7 MPa i srednja čvrstoća na pritisak od 26.6 MPa .

Na slici 11 a) prikazani su dijagrami dilatacije – naponi zatezanja za šest ispitanih uzoraka laminata koji su kao matricu imali malter SM u tri sloja, ukupne debljine 2 cm , i bili armirani s tri reda staklene mrežice, težine 160 gr/m^2 . Mrežica je postavljena u tri položaja, horizontalno jedan red, srednji red dijagonalno i treći red vertikalno. Na ovaj način, u laminatima je simuliran položaj mrežica u zidovima koji su radi ojačanja oblagani ovim FRCM kompozitnim sistemom.



Slika 11. Dijagram „dilatacije – naponi zatezanja” u laminatima sa SM matricom
Figure 11. Diagram „strains-tensile stresses” in laminates with SM matrix

3.6 Zidovi ojačani s tri vrste FRCM kompozitnih sistema

Nakon analize rezultata prve etape testiranja sedam vrsta FRCM sistema, zaključeno je da odabrane isprkale uzorke zidova treba ojačati s tri različita FRCM kompozitna sistema.

Odabrani su uzorci zidova od blok opeke na kojima je registrovana približno slična čvrstoća na smicanje. Zidovi su ojačani sledećim vrstama FRCM sistema:

- B 1.5 - matrica od Betonprotekta RT u tri sloja, ukupne debljine 1.5 cm , ojačan s dvije staklene mrežice težine 160 gr/m^2 ;
- B 2- matrica od Betonprotekta RT u četiri sloja, ukupne debljine 2.0 cm , ojačan s dvije staklene mrežice i u sredini obloge dijagonalno;

FRCM system with matrix from Betonprotekt RT because this is material which is readily available on the market as a ready-mix dry. When examining the matrix from Betonprotekt RT the volume weight of 2149 kg/m^3 was found, tensile strength due to bending 6.5 MPa and average compressive strength from 50.8 MPa .

In order to eliminate the shortcomings that were identified in the matrix from Betonprotekt RT and Ytong's thin mortar the test of more series of mix mortars was used in order to find adequate formulas for new matrix.

The new matrix built from mortar obtained by own recipe is marked as SM matrix. It consists of: cement, hydrated lime, silica fume, fly ash, crushed brick, finely granulated sand (fraction less than 3mm) and water.

After testing laminates with SM matrix it was found that its volume weight is 1986 kg/m^3 , tensile strength is 5.7 MPa due to bending and the average compressive strength is 26.6 MPa .

Figure 11 a) presents diagram strain – stresses for six samples of tested laminates, with mortar matrix SM in three layers; the total thickness is 2 cm , and they were reinforced with three rows of glass fibre mesh weight of the mesh 160 gr/m^2 . The mesh is placed in three positions: horizontal first row, diagonally row in the middle and the third row vertically. In this way, the laminates were simulated position of meshes in the walls, which were used as lining with the aim of strengthening cracked walls by FRCM composite system.



3.6 The walls strengthening with three types of FRCM composite systems

After analyzing the results of the first stage of testing seven types of FRCM system, it is concluded that the selected cracked walls samples should be strengthened with three different FRCM composites system types.

The walls made of brick block, on which was registered the same shear strength, have been selected as the samples. The walls have been strengthened with the following types of FRCM systems:

- B 1.5 – matrix from Betonprotekt RT in three layers, total thickness 1.5 cm , strengthened with two fibreglass mesh, weight 160 gr/m^2 ;
- B 2- matrix from Betonprotekt RT in four layers, total thickness 2.0 cm , strengthened with two fibreglass mesh and one in the middle of lining set diagonally;

– SM 2, malter po sopstvenoj recepturi, u četiri sloja, ukupne debljine 2.0 cm, ojačan s dvije staklene mrežice i u sredini obloge dijagonalno.

Na slici 12 prikazano je vanjsko ojačavanje isprskalag zida od blok opeke FRCM sistemom koji je kao matricu imao SM malter debljine 2 cm i bio armiran s tri sloja staklene mrežice težine 160 gr/m².

– SM 2, mortar by own recipes in four layers, total thickness 2.0 cm, strengthened with two fibreglass mesh and one in the middle of lining set diagonally.

Figure 12 presented external strengthening of cracked wall made of brick blocks by FRCM system which has SM mortar thickness of 2.0 cm as matrix that is reinforced with three layers of fibreglass mesh, weighting 160 gr/m².



Slika 12. Ojačavanje isprskalnih zidova FRCM kompozitnim sistemom SM2
Figure 12. Strengthening of cracked walls with FRCM composite system SM2

4 REZULTATI ISPITIVANJA OJAČANIH ZIDOVA

Odabrani isprskali zidovi, nakon vanjskog ojačanja odabranim FRCM kompozitnim sistemima, ponovo su testirani apliciranjem sile pritiska po dijagonali radi registracije čvrstoće na smicanje ojačanih uzoraka.

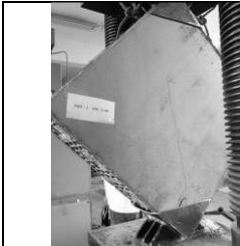
U tablici 6 prikazana je čvrstoća na smicanje odabranih ispućalih uzoraka zidova prije i nakon ojačavanja od blok opeke s različitim vrstama obloga od FRCM sistema.

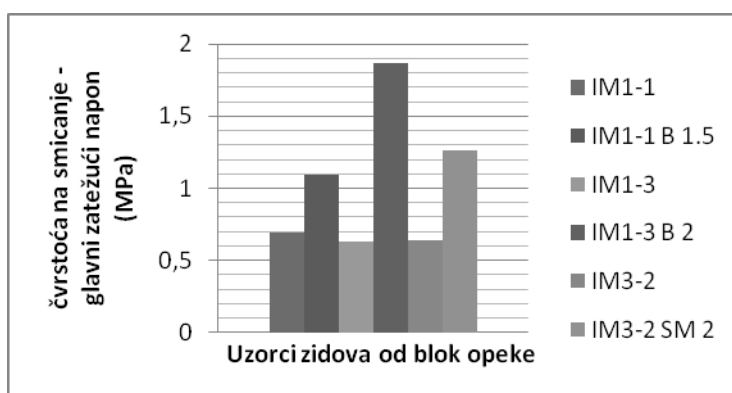
4 TESTING RESULTS OF STRENGTHENED WALLS

After external strengthening by selected FRCM composite systems chosen cracked walls were re-tested by applying the compressive force on the diagonal in order to register the shear strength of strengthened samples.

Table 6 shows the shear strength of selected samples of cracked walls before and after strengthening brick block walls with different types of FRCM system linings.

Tabela 6. Čvrstoća na smicanje zidova prije i poslije ojačanja FRCM oblogama, (MPa)
Table 6. Shear strength of walls before and after strengthening with FRCM coverings, (MPa)

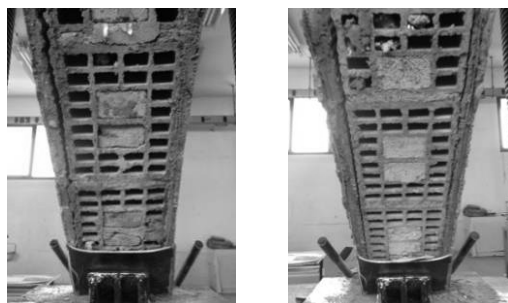
	Zidovi od blok opeke Walls made from brick blocks	Čvrstoća na smicanje τ_i (MPa) Shear strengths τ_i (MPa)
		IM1-1
	IM1-1 B 1.5	1.09
	IM1-3	0.63
	IM1-3 B 2	1.87
	IM3-2	0.64
	IM3-2 SM 2	1.26



Slika 13. Prikaz čvrstoće na smicanje u zidovima od blok opeke prije i nakon ojačavanja
Figure 13. Views of shear strength in the brick block walls before and after strengthening

Na slici 13 prikazan je dijagram čvrstoća na smicanje zidova od blok opeke, dimenzija 25x19x19 cm, prije ojačavanja i nakon ojačavanja s tri različita FRCM sistema obloga.

Nepovoljnost je što se obloga s matricom od Betonprotekt RT u trenutku loma odljepljuje od zida, što se vidi na slici 14.



Slika 14. Odvajanje od zida obloge koja kao matricu ima Betonprotekt RT
Figure 14. Separation of walls coverings which have Betonprotekt RT matrix

Na osnovu registrovanih vrijednosti sila loma na testiranim zidovima, sračunato je da se sa oblogom od Betonprotekt RT debljine 1.5 cm, sistem B 1.5, čvrstoća na smicanje ojačanog isprskalog uzorka uvećava 50% u odnosu na čvrstoću na smicanje neisprskalog zida. U zidu sa oblogom od Betonprotekt RT debljine 2 cm, sistem B 2, čvrstoća na smicanje se uvećala tri puta. U zidovima ojačanim FRCM sistemom SM2, čvrstoća na smicanje je uvećana 100% u odnosu na čvrstoću na smicanje odgovarajućeg neisprskalog zida.

5 ZAKLJUČAK

Sprovedena istraživanja ukazuju na to da je karakteristična čvrstoća na pritisak zidanih zidova od blok opeke niža od analitičkih vrijednosti sračunatih u skladu s važećim propisima, kao i sa evropskim i američkim standardima. Tehničke propise iz oblasti zidanih konstrukcija treba inovirati, uzimajući u obzir karakteristike materijala za zidanje koji se koriste kod nas. Stoga, nacionalno određene parametare u evropskim standardima za projektovanje zidanih konstrukcija treba pažljivo procijeniti uvažavajući ova istraživanja, ali i eventualna slična ispitivanja koja su rađena u zemljama regiona.

FRCM kompozitni sistemi jesu nova, relativno jeftina i lako primjenljiva tehnologija za vanjsko ojačavanje konstrukcija. Testiranja FRCM kompozitnih sistema, prikazana u ovom radu, ukazuju na visok doprinos FRCM obloga u podizanju kapaciteta nosivosti na smicanje ojačanih zidova. Obloge koje su kao matricu imale maltere SM mješavine, izrađene po našoj recepturi, imale su bolje prianjanje za zidove od obloga s matricom od Betonprotekt RT.

U radu prezentirani rezultati izvršenih testiranja pokazuju da FRCM sistemi nakon dodatnih istraživanja mogu naći uspješnu primjenu u građevinskoj praksi. U budućim istraživanjima treba poboljšati svojstvo obradivosti SM matrice i detaljnije istražiti reološka svojstva materijala.

Figure 13 shows a diagram of the shear strength of the brick block walls, dimensions 25x19x19, before strengthening and after strengthening with three different FRCM lining systems.

The disadvantage is that the lining which has a Betonprotekt RT as matrix is unglued from the wall, as shown in figure 14.

Based on the registered value of breaking force on the tested walls it is calculated that with lining from Betonprotekt RT thickness 1.5 cm, system B 1.5, shear strength of strengthened cracked sample increased 50% compared to the shear strength of the not cracked wall sample. In the wall with lining from Betonprotekt RT thickness 2.0 cm, system B 2, shear strength are three times higher than strength of cracked wall sample. In the walls that have been strengthened by SM2 system, shear strength has been increased 100% in relation to the shear strength of the corresponding not cracked wall.

5 CONCLUSION

The research reports indicated that the characteristic compressive strength of masonry walls made of brick block is below the value calculated analytically in accordance with current regulations, as well as European and American standards. Technical regulations in the field of masonry structures should be innovated by taking into account the characteristics of the masonry materials that are used by us.

Therefore, nationally determined parameters in European standards for the design of masonry structures should be carefully assessed taking into account this research but also other similar tests that were conducted in the region.

FRCM composite systems are new, relatively inexpensive and easily applicable technology for shear strengthening of structures. Testing of FRCM composites, presented in this paper, indicate a high contribution of FRCM linings to shear capacity of the wall. The linings which had as matrix SM mortars mixture, made accordance with our recipe, had a better adhesion between walls and linings than linings with the matrix made of Betonprotekt RT.

The results of the research presented in this paper show that after additional research FRCM system can find successful application in building practice. In future research workability of SM mortar matrix should be improved and further investigated the rheological properties of the materials.

6 LITERATURA REFERENCES

- [1] AC434-13 Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems, 2011.
- [2] Arboleda, D., *Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites for Infrastructure Strengthening and Rehabilitation: Characterization Methods*, A Dissertation, University of Miami, 2014.
- [3] Babaeidarabad S., *Masonry Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite Subjected to In-Plane and Out-of-Plane Load*, A Dissertation, University of Miami, November 2013.
- [4] Denić V., *Zidane konstrukcije i novi evropski standardi*, Materijali i konstrukcije br. 50, 2007 str. 51–55
- [5] Folić R., Glavardanov D., *Mehanizami oštećenja, modeli održavanja i sanacija betonskih konstrukcija pojačanih FRP elementima*, Materijali i konstrukcije br. 52, 2009 str. 63–73
- [6] Tomažević M., *Introducing Eurocodes and the Calculation of Seismic Resistance of the Masonry Constructions*, Materijali i konstrukcije br. 51, 2008 str. 3–24
- [7] Tumialan G., De Luca A., *FRCM Systems: „The Second Generation of Externally-Bonded Composite Systems for Strengthening of Concrete and Masonry Structures”* - Structure - Septembar 2014.

REZIME

OJAČANJE FRCM KOMPOZITIMA ZIDANIH ZIDOVA OD BLOK OPEKE

Željka RADOVANOVIĆ
Sretena DIMOVSKI
Ilija LALOŠEVIĆ

U radu se prezentiraju rezultati testiranja više serija zidanih zidova od blok opeke, radi utvrđivanja njihovih mehaničkih karakteristika i mogućnosti eksternog ojačavanja zidova FRCM kompozitima. Na osnovu rezultata testiranja, utvrđene su karakteristične čvrstoće na pritisak, moduli elastičnosti i čvrstoće na smicanje za različite vrste zidova. U radu je dato poređenje rezultata dobijenih u eksperimentalnim istraživanjima i vrijednosti dobijenih analitički u skladu s važećim standardom, evropskim standardom EN 1996 i američkim standardom ACI 530. Nakon testiranja apliciranjem sile po dijagonali zida, isprskali uzorci zidova ojačavani su odabranim tipovima FRCM kompozita i ponovo testirani. Utvrđeno je da se otpornost zidova na smicanje nakon ojačavanja značajno povećala.

Ključne riječi: zidane konstrukcije, blok opeka, eksperiment, ojačanja, FRCM kompoziti

SUMMARY

STRENGTHENING MASONRY WALLS MADE OF BRICK BLOCKS WITH FRCM COMPOSITES

Željka RADOVANOVIĆ
Sretena DIMOVSKI
Ilija LALOŠEVIĆ

Results of testing more types of masonry walls made of brick blocks with the aim to define their mechanical characteristics and possibilities of external strengthening of walls with FRCM composites are presented in this paper. The characteristic compressive strengths, elasticity modulus and shear strengths of the various types of the walls were obtained on the basis of these testing results. Comparison between experimental results and values obtained by analytical approach in accordance with the current standard, European standards EN 1996 and the American standard ACI 530 is presented in this paper. After testing walls with application of compressive forces on the walls diagonal the cracked walls samples have been strengthened with selected types of FRCM composites. It was determined that the shear resistance of the walls after strengthening has increased significantly.

Key words: masonry structures, brick blocks, experiment, strengthening, FRCM composites

ANALIZA STABILNOSTI NEKIH IZVEDENIH KABLOVSKIH REŠETAKA

STABILITY ANALYSIS OF SOME CONSTRUCTED CABLE TRUSSES

Dragan KOSTIĆ
Vuk MILOŠEVIĆ

STRUČNI RAD
PROFESSIONAL PAPER
UDK: 624.074.5
doi:10.5937/grmk1502039K

1 KONSTRUKCIJSKE KARAKTERISTIKE NEKIH IZVEDENIH KABLOVSKIH REŠETAKA I CILJ ISTRAŽIVANJA

Izgradnja stadiona za zimske sportove, 1956. godine, u Johaneshovu kod Stokholma u Švedskoj, koji je pokriven kablovskim rešetkama, dovela je do masovne primene ovih konstrukcija [4–11]. Tako je u periodu od nekoliko godina izgrađeno više od stotinu objekata koji su pokriveni ovim konstrukcijskim sistemom. Objekti čije su karakteristike prikazane u Tabeli 1 izabrani su kao tipični primeri kablovskih rešetaka za pokrivanje raspona koji se kreću od 60 m do 80 m, s lakim krovnim pokrivačem. U Tabeli 1 date su konstrukcijske šeme, konfiguracije nosača, raspon i dužina objekta, međusobni razmak kablovskih rešetaka, način njihovog oslanjanja i opterećenja [2, 6, 9, 11, 12,14, 16]. Originalni metod proračuna prikazanih objekata bio je analitički, osim za sportski kompleks „Zdravlje” u Leskovcu, gde je primenjen Transient Stiffness Method.

Cilj ovog istraživanja jeste dokazivanje ispunjenosti kriterijuma stabilnosti kablovskih rešetaka. Neki od kriterijuma stabilnosti izvedeni su nakon izgradnje analiziranih objekata [1, 12, 13]. Metodologija dokazivanja zasniva se na primeni prikladne metode proračuna za opterećenja koja su korišćena prilikom projektovanja analiziranih konstrukcija.

Dobijeni rezultati proračuna (pomeranja i sile u štapovima) biće analizirani iz aspekta tačnosti, u odnosu na dostupne podatke u vreme projektovanja i zadovoljenja kriterijuma stabilnosti, utvrđivanje nivoa prednaprezanja - uvođenje početne sile zatezanja u kablovski nosač i donošenje zaključaka u pogledu potrebnih minimalnih sila, odnosno potrebe da se eventualno izvrši

1 CONSTRUCTION CHARACTERISTICS OF SOME DERIVED CABLE TRUSSES AND THE AIM OF THE RESEARCH

After the stadium for winter sports, which was covered with cable truss structure, was constructed in Johaneshov near Stockholm in Sweden in 1956, cable trusses have become widely used while constructing such buildings [4-11]. Thus, within several years, more than a hundred buildings were covered using this construction system. The buildings whose characteristics are shown in Table 1 were chosen as typical examples of cable trusses for covering spans from 60 to 80 meters using light roofs. Table 1 presents the construction schemes, the configuration of girders, the span and the length of the buildings, the spaces between the cable trusses, the way of their supporting and loading [2,6,9,11,12,14,16]. The original calculation method of the shown buildings was analytical except for the Sports complex “Zdravlje” in Leskovac where Transient Stiffness Method was used.

The aim of this research is to prove the fulfilment of stability criteria of cable trusses. Some of the stability criteria were derived after the construction of the analysed buildings [1, 12, 13]. The methodology of proving is based on applying an appropriate calculation method for the particular loadings that were used in the design process of the analysed structures.

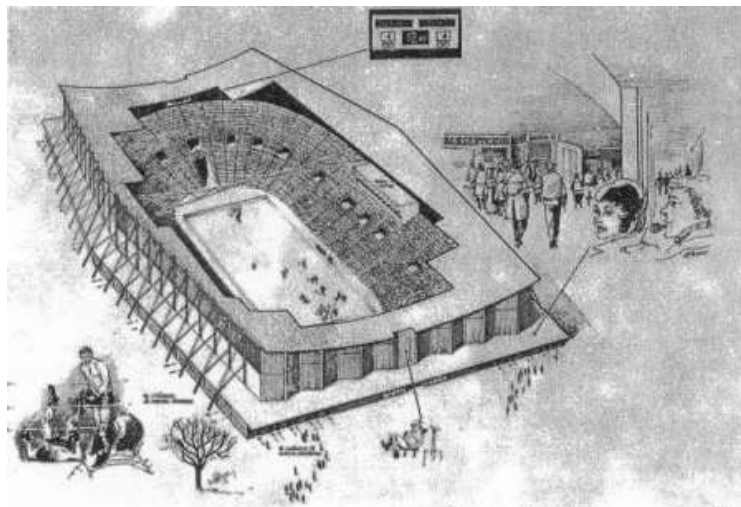
The results which were obtained through the calculations (displacements and forces in cable members) are going to be analysed from the point of view of their accuracy in relation to the data available at their constructing time as well as the fulfilment of stability criteria, estimating the level of prestressing - the introdu-

Dragan Kostić, dr, v.prof., Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, dragan.kostic@gaf.ni.ac.rs
Vuk Milošević, m.i.a., asistent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, vukamer@yahoo.com

Dragan Kostić, dr, v.prof., University of Nis, Faculty of Civil Engineering and Architecture, dragan.kostic@gaf.ni.ac.rs
Vuk Milošević, m.i.a., asistent, University of Nis, Faculty of Civil Engineering and Architecture, vukamer@yahoo.com

korekcija unetih sila i do koje mere - u pogledu statičke stabilnosti. Posebno će biti posvećena pažnja provjeri kriterijuma stabilnosti kablovskih rešetaka, koji su izvedeni nakon izgradnje analiziranih objekata.

ction of the initial stressing force into the cable girder and drawing conclusions concerning the necessary minimum forces, or the need to make any corrections of the introduced forces and up to which level concerning its static stability. Special attention will be paid to checking stability criteria of cable trusses which were derived after the construction of the analyzed buildings



Slika 1. Prva kablovska rešetka izrađena 1956. godine – Pokriveno klizalište u Johaneshovu kod Stokholma (Švedska), konstruktor Dawid Jawert

Figure 1. The first cable truss constructed in 1956-Roof of Ice Skate Rink in Johaneshov near Stockholm in Sweden Structural engineer David Jawert

2 KRITERIJUMI STABILNOSTI

U vreme gradnje objekata koji su analizirani u ovom radu, korišćeni su kriterijumi stabilnosti koji nisu bili definisani posebnom regulativom za kablovske krovne konstrukcije, već su primenjivane preporuke projektanta i istraživača koji su u tom periodu radili na razvoju modela proračuna (Jawert, Nowitcki, Sobotka) i njegove primene u praksi [11, 14, 17, 18]. U tom periodu, korišćena je analitička metoda za utvrđivanje sila u štapovima i pomeranja, što je u matematičkom pogledu bio dosta složen zadatak. Tadašnji kriterijumi stabilnosti bili su ograničeni na statičke parametre [11, 14, 18]:

(1) Maksimalna dozvoljena vertikalna pomeranja konstrukcije ne smeju biti veća od dozvoljenih ($L/250$);

(2) Nijedan od pojasnih kablovskih elemenata ne sme biti nenapregnut, tj. kablovski elementi u svim fazama opterećenja moraju biti zategnuti;

(3) Efektivna projektna jačina kabla mora biti jednaka najvećim vrednostima sila u kablovima koje nastaju pod uticajem različitih kombinacija opterećenja, ili veća od njih.

Razvojem numeričkih metoda i postupaka proračuna primenom matrice analize za geometrijski nelinearne strukture u elastičnoj oblasti, povećala se preciznost proračuna i pooštrili su se uslovi koje kablovska krovna konstrukcija treba da ispuni kako bi se smatrala stabilnom [3, 12–14].

2 STABILITY CRITERIA

At the period of time when the structures analysed in this paper were constructed, the stability criteria which were used had not been defined by special regulation which would deal with cable roof construction. The recommendations of their constructors or researchers who were working on developing calculation models and their application in practice were often used; some of them were Jawert, Nowitcki and Sobotka. [11, 14, 17, 18]. At that period of time analytical method for obtaining the forces in cable members and movements was used. It was a rather complex task from mathematical point of view. Stability criteria at that time were limited to static parameters. [11, 14, 18]

(1) Maximum allowed vertical displacements of a structure must not be larger than the allowed ones ($L/250$),

(2) None of the main cable elements couldn't be unstressed, i.e. cable elements must be stressed in each of the loading phases,

(3) The effective designed cable strength must be equal or larger than the largest force values in the cables resulting from the influence of different loading combinations

After the development of numerical methods and the improvement of calculation procedures using matrix analysis for geometrically nonlinear structures in the elastic area the precision of calculations was increased and the criteria which must be fulfilled by cable roof con-

a) Standardizovani žičani kablovi: zaštićeni protiv korozije, relaksirani, sa ugrađenim odgovarajućim završnim elementima i spojnica;

b) Efektivna projektna jačina kabla mora biti jednaka ili veća od najveće vrednosti sila u kablovima koje nastaju pod uticajem različitih kombinacija opterećenja, multiplikovana odgovarajućom konstantom [2];

c) Maksimalna dozvoljena pomeranja konstrukcije ne smeju biti veća od propisanih [3,14];

d) Nijedan od kablovskih elemenata ne sme biti nenapregnut, tj. kablovski elementi u svim fazama opterećenja moraju biti zategnuti [3,14];

e) Uslovi za postizanje rezonance ili kvazirezonance, koji dovode do velikih deformacija, moraju se izbeći u slučaju da viseći krovovi budu izloženi dinamičkim opterećenjima (vetar, eksplozija ili zemljotres) [3, 14].

3 PREGLED METODA PRORAČUNA

Za razliku od jednostavnijih konstruktivnih sistema, kablovske rešetke karakteriše nelinearno ponašanje koje nije uzeto u obzir kod uobičajenih metoda proračuna. Zbog toga su uvedene neke nove metode koje uzimaju u obzir geometrijsku nelinearnost kablovskih rešetaka. Najprimenljivije metode su force density metoda, dynamic relaxation metoda i transient stiffness metoda [15]. One će biti detaljnije objašnjene.

3.1 Force density metoda

Ova metoda nastala je sredinom prošlog veka, zajedno s prvim značajnijim objektima izgrađenim u sistemu kablovskih struktura. Osnovna pretpostavka je prilično jednostavna - odnos intenziteta sile zatezanja u svakom elementu, odnosno kablju, i dužine elementa jeste konstantan. Po ovom odnosu metoda je i dobila ime, jer u bukvalnom prevodu znači „gustina sile”. Koristeći ovu pretpostavku, sistem jednačina koji opisuje geometriju strukture svodi se na linearan sistem u kome su nepoznate samo pomeranja čvorova. Ovakav sistem može se rešiti i ručno kada nema veliki broj elemenata, ali se za uobičajene konstrukcije uvek koriste računari zbog bržeg i tačnijeg proračuna. Kao konačan rezultat dobija se ravnotežna geometrija sistema štapova. Odnos intenziteta sile zatezanja u kablju i dužine kabla neophodno je pretpostaviti. On može biti različit za različite kablove. Ukoliko se ovaj odnos proporcionalno promeni za sve kablove, neće se promeniti geometrija, već samo intenzitet sila u kablovima.

structions in order to be considered stable were more strictly defined [3, 12-14].

a) Standardized wire cables: protected against corrosion, stress relaxed, with the inbuilt appropriate support elements and connectors,

b) Effective projection cable strength must be equal or larger than the largest force values in the cables resulting from the influence of different loading combinations multiplied by an appropriate constant value [2],

c) Maximum allowed movements of a structure must not be larger than those defined by technical regulations [3, 14];

d) None of the cable elements must be unstressed, i.e. cable elements must be stressed in each of the loading phases [3, 14]

e) The conditions for obtaining resonance or the so-called resonance which cause large deformities must be avoided in the cases when hanging roofs are exposed to dynamic loadings (wind, explosion or earthquake) [3, 14].

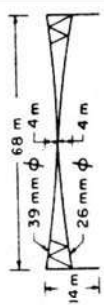
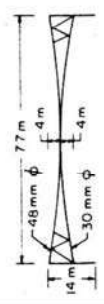
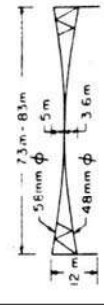
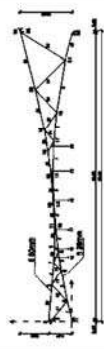
3 CALCULATION METHODS SURVEY

Since cable trusses differ from other simple construction systems they are characterized by nonlinear behaviour which was not taken into account while common calculations methods were used. That was the reason for introducing some new methods which take into account geometrical nonlinearity of cable trusses. The methods which were mostly used are Force Density Method, Dynamic Relaxation Method and Transient Stiffness Method [15]. They will be explained in more detail.

3.1 Force Density Method

This method was established in the middle of the 20th century at the same time when the first important buildings with cable trusses systems were constructed. The basic presumption is rather simple and it states that the ratio of the stressing force in each of the elements, i.e. cables and of the element's length is a constant one. The method itself got its name after the word 'ratio', because if translated literally it means 'the density of forces'. Using this presumption, the system of equations which describes geometry of the structure can be derived to a linear system in which only the nodes transitions are unknown. This kind of system can be easily calculated without using computers if the number of elements is not a large one. However, computers are always used for common constructions because the calculation is faster and more accurate. As the final result we get equilibrium geometry of the system of rods. The ratio between the intensity of the prestressing force in a cable and the length of a cable must be assumed. It can be different for different cables. If this ratio is proportionally changed for all of the cables the geometry will not change. Only the intensity of forces in cables will change.

Tabela 1. Konstruktivske karakteristike nekih kablovskih rešetaka
Table 1. Structural properties of some constructed cable trusses

Objekat Structures	Sportska hala u Bilinghemu, Engleska Sports Hall in Bellingham (England) [14]	Prolazni magacin u Šipholu, Holandija Transitory Warehouse in Shiphal (the Netherlands) [14]	Ledena dvorana u Johaneshovu, Švedska The Ice Rink Hall in Johaneshov (Sweden) [14]	Sportski kompleks "Zdravlje" u Leskovcu, Srbija Sports complex "Zdravlje" in Leskovac (Serbia) [2, 12]
Shema Chart (Scheme)				
Međusobni razmak nosača Distance of girders	3.35 m	4.7 m	5.28 m	5.0 m
Dužina objekta Length of structures	40 m	140 m	120 m	45 m
Tip oslonjačke konstrukcije Supporting structure	Izvrnuti luk Inverted arch	Čelični stubovi i zatege Steel columns and stay cables	Čelični stubovi i zatege Steel columns and stay cables	AE stubovi i čelične zatege RC columns and steel ties
Broj čvorova konstrukcije Number of nodes	19	19	19	24
Slobodni/oslonjački čvorovi Free/support nodes	15 / 4	15 / 4	15 / 4	18 / 6
Broj štapova Number of members	30	30	32	35
Noseći/dijag./stabilizujući carrying / diagonal / prestressing	10 / 12 / 8	10 / 12 / 8	10 / 14 / 8	10 / 15 / 10
Površine poprečnih preseka area of cross section	1000 / 400 / 446 mm ²	1520 / 400 / 594 mm ²	2325 / 600 / 1592 mm ²	1511 / 381 / 400 mm ²
Prednaprezanje (ekvivalent) Prestress (equivalent)	0.28 kN/m ²	0.20 kN/m ²	0.39 kN/m ²	0.15 kN/m ²
Opterećenja kN/m ² Load kN/m ²	0.40 0.75 -0.60 -20 do +20	0.50 0.50 -0.42 -10 do +25	0.42 1.00 -0.40 -20 do +20	0.35 1.00 -0.64 -15 do +15
Pomeranja u odnosu na projektovani položaj Displacement from designed position; m	0.530 -0.280	0.400 -0.310	0.430 -0.180	0.204 -0.142
s = sneg/snow w = vetar/wind				

3.2 Dynamic relaxation metoda

Ova metoda razvijena je u isto vreme kada i force density metoda. Koristi se za analizu kablovskih struktura, kao i drugih tipova konstrukcija. Metoda se zasniva na diskretizaciji prostora i koncentrisanju masa u čvorovima diskretizovane mreže. Ovakav sistem osciluje pod dejstvom opterećenja dok ne dođe do stanja mirovanja izazvanog prigušenjem koje se javlja u sistemu. Primenjuju se dve vrste prigušenja: viskozno i kinetičko. U slučaju viskoznih prigušenja treba pretpostaviti koeficijent prigušenja prema postojećim smernicama. Pogrešan odabir vrednosti ovog koeficijenta dovodi do sporije konvergencije i produžava proces nalaženja ravnotežne geometrije sistema. U slučaju kinetičkog prigušenja primenjuje se iterativni postupak koji u konačnom dovodi do toga da rezidualne sile teže nuli, odnosno da sistem dolazi u ravnotežnu geometriju.

3.3 Transient stiffness metoda

Ova metoda nastala je razvojem metoda koje imaju pretpostavku malih pomeranja, odnosno uzimaju u obzir geometrijski nelinearno ponašanje konstrukcija. Sama metoda je nelinearna. Matematički, problem se formuliše u vidu sistema linearnih algebarskih jednačina, koji se uspešno rešava primenom Njutn-Rafsonove metode - iterativnim postupkom¹. Postupak rešavanja sistema jednačina ponavlja se sve dok vektor, koji predstavlja deo neuravnoteženog opterećenja u svim čvorovima sistema, ne bude jednak nuli ili se ne svede na približno dovoljno malu vrednost, koja bitno ne utiče na željenu tačnost rezultata.

Metoda primenjuje seriju koraka u kojima se izračunavaju pomeranja, pri čemu se u svakom narednom koraku menja matrica krutosti. Otuda i naziv metode koji u bukvalnom prevodu znači metoda kratkotrajnih ili trenutnih krutosti. Postupak promene matrice krutosti nastavlja se dok rezidualne sile ne postanu bliske nuli. U poređenju s dynamic relaxation metodom, transient stiffness metoda dolazi do ravnotežne geometrije putem manjeg broja iteracija, ali je zato trajanje tih iteracija duže.

Osnovni problem u proračunu ovim postupkom jeste kako da se pretpostave ulazni podaci za „početni” tzv. referentni položaj (sile i geometrija), imajući u vidu da u štapovima konstrukcije deluju sile, iako na nju ne deluje spoljašnje opterećenje. Za pretpostavljene sile i geometriju, sistem treba da je u ravnoteži.

¹Svaki iterativni postupak podrazumeva aproksimaciju - pretpostavku početnih, ulaznih podataka

3.2 Dynamic Relaxation Method

This method was also made at the same time when the Force Density Method was made. It is used both for analyzing cable structures and for analysing other types of constructions. The method is based on the discretion of space as well as on the concentration of masses in the nodes of the discrete truss. A system like this oscillates under the influence of loading until it reaches the state of lull caused by the suppression that occurs in the system. Two kinds of suppression are applied: viscous and kinetic. In viscous suppressions it is necessary to presume the coefficient of suppression according to the already existing directions. Choosing wrong values of this coefficient results in a slower convergence and makes the process of finding the equilibrium of systems' geometry much longer. Iterative procedure is used in kinetic suppression and it finally leads to the fact that the residual forces tend to equal zero, and the system reaches geometrical equilibrium.

3.3 Transient Stiffness Method

This method was being made together with the development of the methods which were based on the presumption of small displacements, i.e. the methods which take into account geometrically nonlinear behaviour of structures. The method itself is nonlinear. Mathematically speaking, the problem is defined as a system of linear algebraic equations which can easily be solved using Newton-Raphson's method the iterative procedure. The procedure of solving the equations is repeated until the vector which represents a part of unbalanced loading in all system's nodes equals zero or reaches the value which is so small that it cannot significantly influence the sought accuracy of results.

This method consists of a series of steps through which transitions are calculated and in each further step the matrix of stiffness is changed. That is why it got its name similar to its literal translation meaning short term or temporary stiffness. The procedure of changing the matrix of stiffness is continued until the residual forces reach approximately zero. When compared to Dynamic Relaxation Method, Transient Stiffness Method obtains equilibrium geometry using a smaller number of iterations but the time of iterations is longer.

The basic problem while using this procedure is how to predict the input data for the 'initial', the so called referential position (forces and geometry) having in mind that there are forces which are present in construction rods although itself it is unaffected by any external loading. For the predicted forces and geometry the system should be in equilibrium position.

3.4 Analitička metoda

Ova metoda upotrebljena je za proračun krovnih nosača na objektima u Johaneshovu [11], Shipholu [14] i Bilinghemu [14]. Zasniva se na korišćenju uslova ravnoteže i promene dužina lančanica pri opterećenju, formiraju se sistemi nelinearnih diferencijalnih jednačina [4–6, 9]. Ovaj način je prilično komplikovan, ako se ne uvedu uprošćenja u postavci problema (npr. kablovska rešetka se posmatra kao neprekidna glatka površ-membrana, opterećenje je vertikalno, ravnomerno raspodeljeno, lančanica je gipka i plitka, ima oblik parabole, oslonci su nepomerljivi, kablovi su idealno elastični). Uprošćenjima i aproksimacijama eliminišu se male veličine višeg reda, pa se linearizuje sistem diferencijalnih jednačina i svodi na lako rešiv problem sa očekivanom greškom od 6% do 10%.

3.5 Kombinovana analitičko-numerička metoda

Osim primene analitičkih i numeričkih metoda, postoji i mogućnost njihove kombinacije. I analitičke i numeričke metode imaju svojih prednosti i mana. Numeričke metode brže rešavaju problem od analitičkih metoda, te dolaze do ravnotežne geometrije sistema kablovske rešetke, ali zato zahtevaju pretpostavljanje ulaznih parametara. Pretpostavljanje ulaznih parametara veoma je važno jer utiče na brzinu proračuna. Jedan od ključnih ulaznih parametara jeste intenzitet sile prednapreznja u kablovima, jer od njega umnogome zavisi stabilnost same rešetke. Postoje preporuke koje se tiču intenziteta sile prednapreznja u kablovima koje bi trebalo da olakšaju pretpostavljanje ovog ulaznog parametra, međutim, postojeće preporuke nisu dovoljno precizno definisane. To za posledicu najčešće ima nedovoljnu zategnutost konstrukcije koja uzrokuje neispunjavanje postojećih kriterijuma stabilnosti. Zato se postupak mora ponavljati iz početka s većim pretpostavljenim intenzitetom sile u kablovima. Ovo ponavljanje dovodi do neželjenog produžavanja ukupnog vremena proračuna, i zato je bilo neophodno naći način da se ceo postupak optimizuje.

Rešenje je pronađeno upravo u kombinaciji numeričkih metoda sa analitičkim. Na ovaj način, koriste se prednosti obe vrste metoda, dok se njihovi nedostaci minimiziraju. Konkretno, analitička metoda koristi se za dobijanje ulaznih parametara za numeričku metodu. Time se izbegava pretpostavljanje parametara, jer ono može biti neprecizno i omogućava nestabilnost konstrukcije koja je vidljiva tek na kraju proračuna. S druge strane, nedostaci primene samo analitičke metode ogledaju se u dužem vremenu proračuna i grešci koja se javlja u rezultatima usled aproksimacija i eliminacije malih veličina višeg reda. Primena računara rešava problem dugog analitičkog proračuna, dok kombinacija s numeričkim metodom smanjuje greške u rezultatima. Kao najpodesnija metodologija za proračun kablovskih rešetaka izabrana je kombinacija analitičkog i numeričkog transient stiffness metoda [12,13]. Već je pomenuto da su pretpostavljanje geometrije i intenziteta prednapreznja najveći problem transient stiffness metode. Kombinacija sa analitičkim metodom rešava ne samo problem intenziteta prednapreznja, već i

3.4 Analytical Method

This method was used for calculating roof girders on the buildings in Johaneshov [11], Shiphol [14], and Bilinghem [14]. It is based on using the equilibrium conditions and the change in catenary lengths while loading it. Systems of nonlinear differential equations are formed [4-6, 9].

This procedure is rather complicated if no simplifications are introduced in defining the problem, (for example a cable truss is regarded to be a continuous plane surface - a membrane, loading is vertical, equally distributed, the catenary is elastic and shallow in the shape of a parable, support points are immovable, cables are ideally elastic...) Simplifications and approximations eliminate small values of a higher rank and lead to a system of differential equations reducing it to a problem that can be solved; the expected error can be from 6% up to 10%.

3.5 Combined analytical-numerical method

Besides being used separately, analytical and numerical methods can be combined. Both analytical and numerical methods have their advantages and disadvantages. The use of numerical methods, if compared to the analytical ones, solve problems more quickly and reach the equilibrium geometry of the cable truss system, but at the same time they require the prediction of the input parameters. The process of predicting the input parameters is very important because it influences the speed of calculation. The intensity of the prestressing forces in cables is one of the most important input parameters, because the stability of a truss itself depends upon it. There are some recommendations concerning the intensity of prestressing forces in cables which could make predicting this input parameter easier, however the already existing recommendations are not defined enough precisely. It causes an inadequate level of construction's stressing leading to the lack of fulfilment of the already existing stability criteria. Thus, the process must be repeated from the very beginning and the prediction of a larger intensity of the forces in cables must be made. This repetition makes the time necessary for completing the calculation much longer and it was necessary to elaborate a new method in order to make the process more adequate.

The situation was resolved by combining the numerical method with the analytical one. In this way it is possible to combine the advantages of both methods and to make their disadvantages less frequent. Precisely speaking, the analytical method is used for obtaining the input parameters necessary for the numerical method. In this way it is possible to avoid predicting parameters because it can be imprecise and lead to construction's instability which is obvious only at the end of the calculation. On the other hand, the shortcomings of using the analytical method only are longer period of calculation time and elimination of small values of higher rank. The use of computers solves the problem of long analytical calculation, while its combination with numerical method lessens the mistakes in results. This combination of the analytical and numerical method was chosen as the most appropriate one for calculating cable

geometriju sistema kablovske rešetke. Za dobijanje referentnog položaja korišćen je modifikovan postupak profesora Balgača [4, 5, 6]. Modifikacija ovog postupka ogledala se u tome što je on prilagođen primeni na računaru i primeni na kablovske rešetke. Istovremeno, određeni elementi proračuna su uopšteni, te je na taj način omogućena njegova primena i na neke druge tipove konstrukcija. Ovako modifikovan postupak profesora Balgača daje izuzetno tačne rezultate za početni položaj sistema i to pri veoma kratkom vremenu proračuna. Glavni uslov za stabilnost prema postupku profesora Balgača jeste postojanje sile kontakta „v”. Sila kontakta je vertikalna komponenta sile kojom prednaprežujući kabl opterećuje noseći. Postojanje sile kontakta prema Balgaču znači da ona mora da postoji i u najnepovoljnijem slučaju opterećenja. Drugim rečima, prednaprežujući kabl uvek mora da opterećuje noseći kako bi kablovska rešetka bila stabilna.

Primena kombinovanog analitičko-numeričkog metoda uslovljena je primenom računara odnosno originalnog¹ softvera „Cabl”, prema blok-šemi datoj na Slici 2. Softver „Cabl” sadrži tri programske celine: „Cabl-T” (modul koji koristi analitičku metodu), „Cabl-TP” (modul koji povezuje analitički dobijene rezultate s modulom koji će ih koristiti kao početne u iterativnom postupku po numeričkoj Transient Stiffness Method) i „Cabl-N” (numerički modul-Transient Stiffness Method).

4 KONTROLA RAVNOTEŽE KABLOVSKIH REŠETAKA U REFERENTNOM POLOŽAJU TRANSIENT STIFFNESS METODOM

Za gore definisane konstrukcije prethodno napregnutih kablovskih rešetaka obešenog krova, izvršena je provera ravnoteže u referentnom položaju (faza potpunog prethodnog naprezanja)[12,13,19]. Pritom, na sistem ne deluje spoljašnje opterećenje. Parametri referentnog položaja: koordinate čvorova i sile u štapovima dobijeni su primenom programa **CABL-T** po metodi prof. Balgača, koja je prilagođena za kablovske rešetke i programski prilagođena za računarsku primenu. Programom **CABL-TP** formirana je ulazna datoteka za transient stiffness metod, tj. definisana konfiguracija sistema: numeracija čvorova, povezivanje štapova, opterećenje i temperaturna promena u štapovima, a za preuzete podatke iz programa CABL-T.

Podaci dobijeni programom CABL-T predstavljaju ravnotežno stanje konstrukcije u referentnom položaju, a dobijeni su analitičkim postupkom prof. Balgača. Transient stiffness metodom, tj. programom **CABL-N**, kontrolisana je ravnoteža sistema, prema blok-šemi postupka proračuna [1] prikazanoj na Slici 2. Dobijeni rezultati

¹ Autor softvera „Cabl” je prvopotpisani autor ovog rada

trusses [12, 13]. We have already mentioned that the prediction of geometry and the intensity of prestressing is the biggest problem of the Transient Stiffness Method. The combination with the analytical method solves both the problem of the intensity of prestressing and geometry of a cable truss. Modified procedure of professor Balgacs [4, 5, 6] was used for obtaining the referential position. The modification of the procedure consisted in the fact that it was adapted to computer use and application on cable trusses. At the same time some of the calculation elements were generalized and in that way it was made possible to use it on some other construction types. This modified procedure of professor Balgacs gives very accurate results for the initial position of system after a very short time of calculation. The most important condition for stability, according to professor Balgacs's procedure, is the presence of the contact force 'v'. The contact force is a vertical component of force through which a prestressing cable loads the carrying one. According to professor Balgacs, the presence of the contact force means that it also must be present in the most unfavourable loading situation. In other words, the prestressing cable must always load the carrying one to ensure the stability of the cable truss.

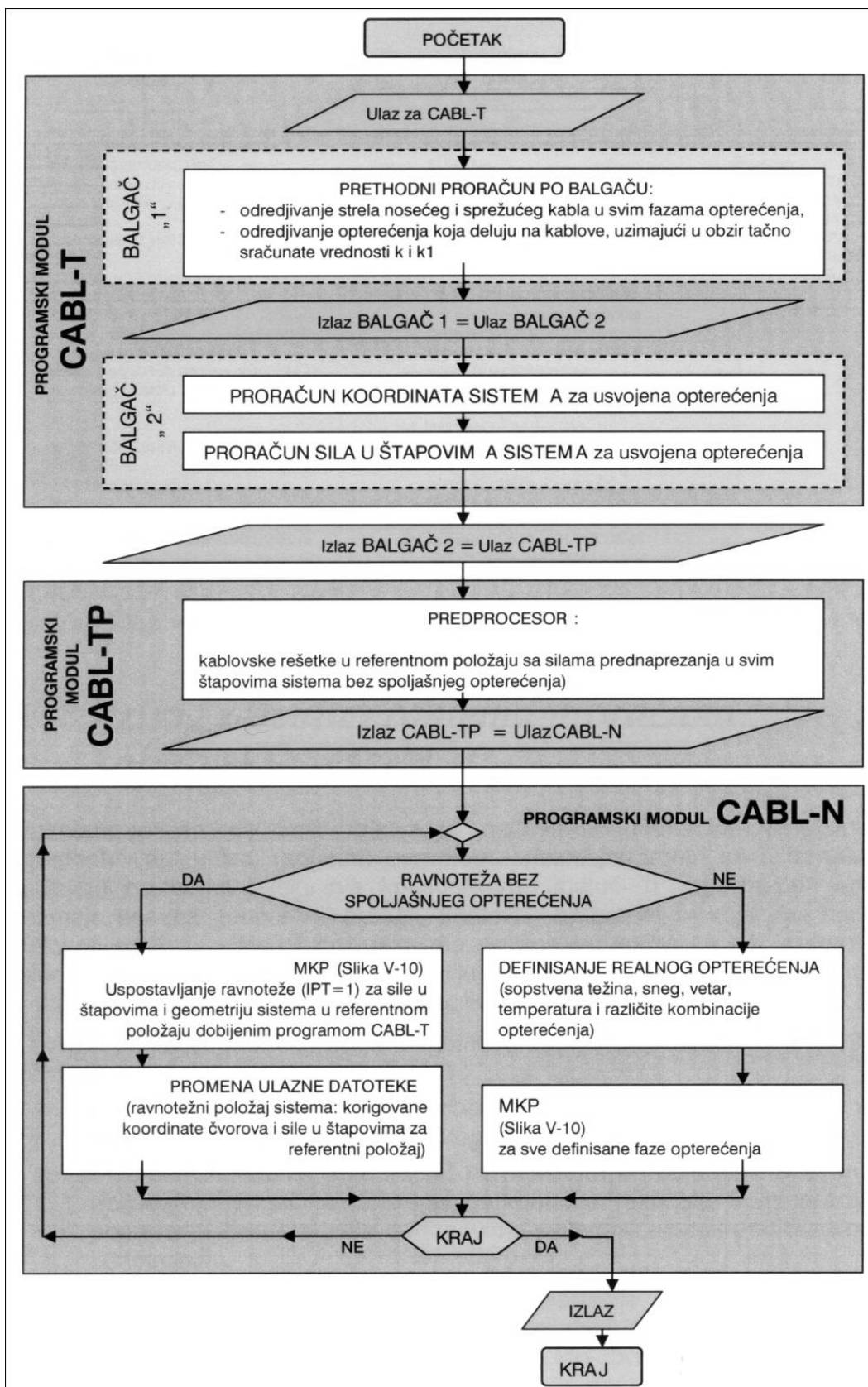
The use of the combined analytical-numerical method is conditioned by the use of PC, actually the original software¹ "Cabl" according to the block-scheme given in Figure 2. The software "Cabl" consists of three programme units: "Cabl-T" (the module uses the analytical method), "Cabl-TP" (the module connects the results which were analytically obtained to the module which is going to use them as the initial ones in the iterative procedure while applying the numerical Transient Stiffness Method), and "Cabl -N" (numerical module-Transient Stiffness Method).

4 CONTROLLING THE EQUILIBRIUM OF CABLE TRUSSES IN THE REFERENTIAL POSITION USING TRANSIENT STIFFNESS METHOD

The control of the equilibrium in the referential position was done for the already mentioned structures since they consist of the prestressed cable trusses of hanged roofs (the phase of complete prestressing) [12, 13, 19]. In this case the system is uninfluenced by external loading. The parameters of the referential position: nodes coordination and forces in members are obtained using the programme "**CABL-T**" according to professor Balgac's method which was adapted both for cable trusses and as a programme for computer use. The input data base for the Transient stiffness Method was obtained through the use of programme "**CABL-TP**" i.e. the configuration of the system was defined: nodes numeration, connection of rods, loading and temperature changes in cable members for the data overtaken from programme "Cabl-T".

The data obtained through CABL-T represent the equilibrium state of the construction in the referential position obtained using the analytical procedure of professor Balgac. Through the use of Transient Stiffness

¹ Author of the software "Cable" is the first signed author of this paper



Slika 2. Blok-šema algoritma analitičko-numeričkog proračuna prethodno napregnutih kablovskih struktura

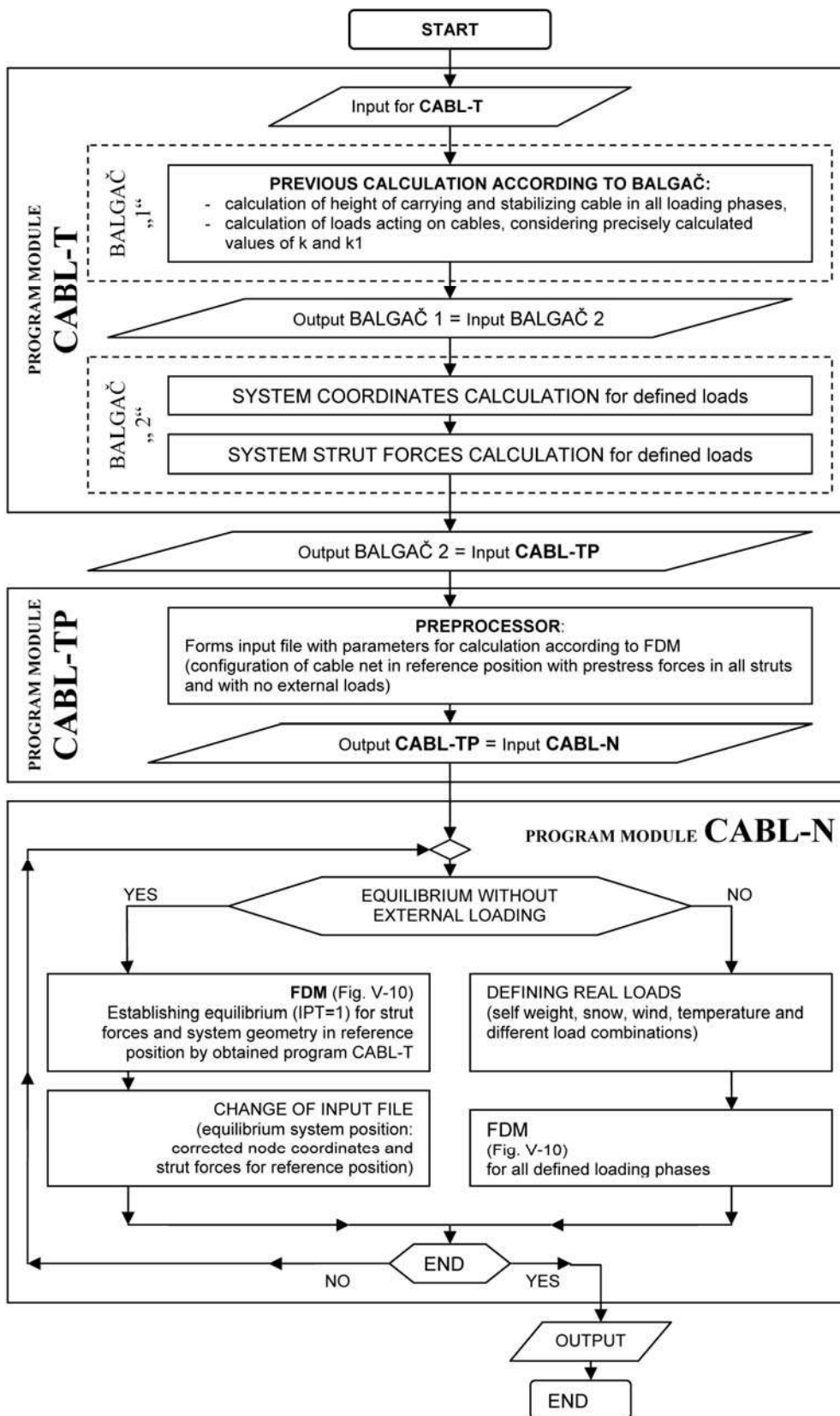


Figure 2. Block diagram of the algorithm of analytical and numerical calculation method for prestressed cable structures

složeni su tabelarno. Zbog preglednosti rezultata, prikazane su samo maksimalne vrednosti pomeranja i sila u pojasnim štapovima:

– Maksimalna korekcija vertikalnih koordinata slobodnih čvorova sistema (Tabela 2). Horizontalna pomeranja su zanemarljivo mala.

– Ukupne sile u štapovima i njihove korekcije (Tabela 3). U sistemu ne postoje nenapregnuti (labavi) stapovi u referentnom položaju.

Method, i.e. the programme **CABL-N** we controlled the equilibrium of the system according to the block-scheme of the calculation procedure [1] shown in *picture 2*. The obtained data are classified in tables. Only the maximum values of movements and the forces in cable members are shown because of an easy survey.

– Maximum correction of vertical coordinates of the system's free nodes (Table 2) Horizontal movements are insignificantly small

– All of the forces in members and their corrections (Table 3). The system does not include unstressed (loose) members in referential position.

Tabela 2. Maksimalna korekcija pomeranja slobodnih čvorova sistema u referentnom položaju – čvor u sredini raspona
Table 2. The maximum displacement correction of free nodes in the reference position - the node in the middle of span

Vertikalni položaj čvora dobijen programom Vertical position of the node obtained from program	Sportska hala u Bilinghemu, Engleska Sports Hall in Bellingham (England)	Prolazni magacin u Šipholu, Holandija Transitory Warehouse in Shiphall (the Netherlands)	Ledena dvorana u Johaneshovu, Švedska The Ice Rink Hall in Johaneshov (Sweden)	Sportski kompleks „Zdravlje” u Leskovcu, Srbija Sports complex “Zdravlje” in Leskovac (Serbia)
CABL-T	4,597 m	4,819 m	4,349 m	4,017 m
CABL-N	4,586 m	4,805 m	4,334 m	3,999 m
Korekcija Correction	1,13 cm	1,36 cm	1,46 cm	1,82 cm
Odstupanje Deviation	2,5 ‰	2,8 ‰	3,4 ‰	4,48 ‰

Tabela 3. Maksimalna korekcija sila u pojasnim štapovima sistema u referentnom položaju
Table 3. The maximum force corrections in cable members in reference position

Vertikalni položaj čvora dobijen programom Force obtained from the program		Sportska hala u Bilinghemu, Engleska Sports Hall in Bellingham (England)	Prolazni magacin u Šipholu, Holandija Transitory Warehouse in Shiphall (the Netherlands)	Ledena dvorana u Johaneshovu, Švedska The Ice Rink Hall in Johaneshov (Sweden)	Sportski kompleks „Zdravlje” u Leskovcu, Srbija Sports complex “Zdravlje” in Leskovac (Serbia)
Gornji-noseći kabl Carrying cable	CABL-T	402,770 kN	617,048 kN	929,168 kN	249,288 kN
	CABL-N	418,751 kN	637,592 kN	966,349 kN	265,722 kN
	Korekcija Correction	15,981 kN	20,544 kN	37,181 kN	16,434 kN
	Odstupanje Deviation	3,82 ‰	3,22 ‰	3,85 ‰	6,18 ‰
Donji-stabilizujući kabl Prestressing cable	CABL-T	298,992 kN	408,463 kN	908,391 kN	237,074 kN
	CABL-N	293,004 kN	400,515 kN	891,884 kN	239,076 kN
	Korekcija Correction	-5,988 kN	-7,948 kN	-16,508 kN	-3,002 kN
	Odstupanje Deviation	2,05 ‰	1,98 ‰	1,85 ‰	1,26 ‰

4.1 Diskusija na osnovu rezultata

Očigledna je opravdanost primene predložene metode za pribavljanje početnih parametara za konačan proračun prethodno napregnutih kablovskih struktura po transient stiffness metodi.

4.1 The discussion of the results

The necessity to use the already suggested method for obtaining the initial parameters for the final calculation of prestressed cable structures according to Transient Stiffness Method is obvious.

Neznatne su korekcije geometrije tačaka sistema, a takođe i sila u štapovima. Maksimalne korekcije geometrije su: 1.13 cm, 1.36 cm, 1.46 cm i 1.82 cm. Maksimalne korekcije sila u štapovima nosećeg kabla jesu: 3,22% do 6,18% u odnosu na silu dobijenu transient stiffness metodom, dok su korekcije sila u štapovima stabilizujućeg kabla u granicama 1,26% do 2,05%.

Pretpostavljeni podaci vrlo su bliski ravnotežnom stanju, jer se konačni ravnotežni položaj dobija kroz 3 iteracije programom CABL-N.

5 PRORAČUN KABLOVSKIH REŠETAKA ZA PRORAČUNSKA OPTEREĆENJA TRANSIENT STIFFNESS METODOM

Tipični primeri kablovskih rešetaka za pokrivanje raspona koji se kreću od 60 m do 80 m, s lakim krovnim pokrivačem, analizirani su u prethodnom odeljku iz aspekta opravdanosti primene kombinovane, analitičko-numeričke metode, za dobijanje parametara u referentnom položaju sistema. Proračun analiziranih kablovskih rešetaka za projektovana opterećenja daće nam odgovore konstrukcija, koji će biti analizirani iz aspekta kriterijuma stabilnosti [12,13,19].

Svaka od analiziranih konstrukcija, prvobitno je prethodno napregnuta - sračunati početni parametri po analitičkoj metodi profesora Balgača, koja je prilagođena za primenu na kablovske rešetke i primenu na računaru (programski modul CABL-T). Pretprocesor CABL-TP formirao je ulaznu datoteku za MKP. Programski modul CABL-N, sa opcijom provere ravnoteže za referentni položaj (faza potpunog prednaprezanja), proverom ravnoteže formirao je i novu ulaznu datoteku INPUT.DAT s podacima o svim fazama opterećenja. Opterećenja deluju na uravnoteženu prethodno napregnutu konstrukciju kablovskih rešetaka.

Opterećenja deluju na konstrukcije, kao što je predviđeno tadašnjim projektima (Tabela 1), a sama konstrukcija prolazi kroz sledeće faze opterećenja, koje deluju na prethodno zategnutu stabilnu konstrukciju:

- (1) Sopstvena težina krova i konstrukcije **g**,
- (2) Sopstvena težina krova i konstrukcije i sneg: **g+s**
- (3) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sneg i sisajuće dejstvo vetra na celoj površini krova: **g+s-w**
- (4) Sopstvena težina krova i konstrukcije i sisajuće dejstvo vetra na celoj površini krova: **g-w**
- (5) Sopstvena težina krova i konstrukcije i negativna temperaturna promena na štapove sistema **g-t**,
- (6) Sopstvena težina krova i konstrukcije i pozitivna temperaturna promena na štapove sistema **g+t**,
- (7) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sneg i negativna temperaturna promena na štapove sistema: **g+s-t**
- (8) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sneg i pozitivna temperaturna promena na štapove sistema: **g+s+t**
- (9) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sneg, sisajuće dejstvo vetra na celoj površini krova i negativna temperaturna promena na štapove sistema: **g+s-w-t**
- (10) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sneg, sisajuće dejstvo vetra na celoj površini krova i pozitivna temperaturna promena na štapove sistema: **g+s-w+t**
- (11) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sisajuće dejstvo vetra na celoj površini krova i negativna temperaturna promena na štapove sistema: **g-w-t**
- (12) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sisajuće dejstvo vetra na celoj površini krova i pozitivna temperaturna promena na štapove sistema: **g-w+t**

The corrections of the system's geometry points, as well as of the forces in members are insignificant. Maximum corrections of the system's geometry points are: 1.13cm, 1.46cm, and 1.82cm. Maximum corrections of the forces in the carrying cable members are: 3.22%, up to 6.18% if compared to the force obtained through the Transient Stiffness Method; whereas the corrections of the forces in the cable members of the stabilizing cable are 1.26% up to 2.05%.

The predicted data are very close to the equilibrium state since the final equilibrium state is obtained through three iterations using the programme "CABL-N"

5 CABLE TRUSSES CALCULATION FOR THE CALCULATION LOADINGS OF THE TRANSIENT STIFFNESS METHOD

Typical examples of cable trusses for covering spans from 60m to 80m long using light roof coverings have been analyzed in the previous chapter. The analysis dealt with the aspects of the appropriate use of applied combined, analytical-numerical method for obtaining the parameters in the referential position of the system. The calculations of the cable trusses for the projected loadings will show us possible construction responses and they are going to be analyzed concerning the aspects of stability criteria. [12, 13, 19].

Each of the analyzed constructions was prestressed first-the initial parameters were calculated according to the analytical method of professor Balgac which had previously been adapted for the use on cable trusses and the use by computers (programme module "CABL-T"). The preprocessor "CABL-TP" had made the input data file for Transient Stiffness Method. Programme module "CABL-N" with the option for checking the equilibrium in the referential position (the phase of complete prestressing), had made a new input data file INPUT.DAT after having checked the equilibrium and it included the data about all loading phases.

The loadings affect the construction as the present projects predicted (Table 1), and the construction itself goes through the following loading phases which affect the prestressed stable construction:

- (1) The own weight of both the roof and the construction **g**
- (2) The own weight of both the roof and the construction and snow load **g+s**
- (3) The own weight of both the roof and the construction, snow and the sucking effect of the wind on the whole roof surface: **g+s-w**
- (4) The own weight of both the roof and the construction and the sucking effect of the wind on the hole roof surface: **g+w**
- (5) The own weight of both the roof and the construction and the negative temperature change on the system's members **g-t**
- (6) The own weight of both the roof and the construction and the positive temperature change on the system's members **g+t**
- (7) The own weight of both the roof and the construction, snow and the negative temperature change on the system's members: **g+s-t**
- (8) The own weight of both the roof and the construction, snow and the positive temperature change on the system's members: **g+s+t**
- (9) The own weight of both the roof and the construction, snow, sucking effect of the wind on the whole roof surface and the negative temperature change in the system's members: **g**

Karakteristični parametri koji utiču na stabilnost analiziranih kablovskih rešetaka prikazani su u Tabeli 4, za sve karakteristične faze opterećenja.

+s -w-t

(10) The own weight of both the roof and the construction, snow, sucking effect of the wind on the whole roof surface and the positive temperature change in the system's members: **g +s -w + t**

(11) The own weight of both the roof and the construction, sucking effect of the wind on the whole roof surface and negative temperature change in the system's members: **g- w- t**

(12) The own weight of both the roof and the construction, sucking effect of the wind on the whole roof surface and positive temperature change in the system's members: **g -w + t**

Specific parameters that affect the stability of the analyzed cable trusses are shown in Table 4, for all specific loading phases

Tabela 4. Karakteristični parametri koji utiču na stabilnost analiziranih kablovskih rešetaka

	Sportska hala u Bilinghemu, Engleska	Prolazni magacin u Šipholu, Holandija	Ledena dvorana u Johaneshovu, Švedska	Sportski kompleks „Zdravlje” u Leskovcu, Srbija
Referentni položaj	Prednaprezanje			
Projektovani položaj	Prednaprezanje i sopstvena težina krova s konstrukcijom			
(1) faza opterećenja	g			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	512.328	860.247	1159.645	405.023
Maksimalna sila u stabilujućem kablu [kN]	276.156	338.104	852.455	210.725
Pomeranja u odnosu na referentni položaj [m]	0.1877	0.3442	0.1874	0.1320
(2) faza opterećenja	g+s			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	737.163	1118.094	1743.888	888.726
Maksimalna sila u stabilujućem kablu [kN]	183.646	242.893	651.260	122.844
Pomeranja u odnosu na projektovani položaj [m]	0.3514	0.3493	0.4542	0.2792
(3) faza opterećenja	g+s-w			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	557.329	901.561	1507.784	581.215
Maksimalna sila u stabilujućem kablu [kN]	255.994	321.174	751.785	179.239
Pomeranja u odnosu na projektovani položaj [m]	0.0713	0.0523	0.2692	0.1038
(4) faza opterećenja	g-w			
Nenapregnuti štapovi	ne	ne	ne	Neki dijag. ²
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	402.156	661.550	967.364	194.286
Maksimalna sila u stabilujućem kablu [kN]	335.104	398.773	911.259	296.851
Pomeranja u odnosu na projektovani položaj [m]	-0.0886	-0.2949	-0.1784	-0.2663
(5) faza opterećenja	g-t			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	540.863	880.818	1229.884	427.371
Maksimalna sila u stabilujućem kablu [kN]	297.095	353.324	949.431	230.347
Pomeranja u odnosu na projektovani položaj [m]	-0.0016	-0.0171	-0.0165	-0.0217
(6) faza opterećenja	g+t			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	484.796	809.471	1090.078	382.892
Maksimalna sila u stabilujućem kablu [kN]	254.204	299.668	814.646	191.480
Pomeranja u odnosu na projektovani položaj [m]	0.018	-0.0255	0.017	0.0237

(7) faza opterećenja					g+s-t			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹				
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	762.125	1136.690	1804.279	907.484				
Maksimalna sila u stabilisućem kablu [kN]	206.402	258.162	729.567	142.829				
Pomeranja u odnosu na projektovani položaj [m]	0.3308	0.3304	0.4293	0.2611				
(8) faza opterećenja					g+s-t			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹				
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	712.537	1072.279	1684.366	870.296				
Maksimalna sila u stabilisućem kablu [kN]	160.815	204.597	572.717	102.927				
Pomeranja u odnosu na projektovani položaj [m]	0.3723	0.3791	0.4797	0.2973				
(9) faza opterećenja					g+s-w-t			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹				
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	584.537	921.784	1571.237	601.161				
Maksimalna sila u stabilisućem kablu [kN]	279.125	336.372	829.982	199.658				
Pomeranja u odnosu na projektovani položaj [m]	-0.0531	0.040	0.2467	0.0861				
(10) faza opterećenja					g+s-w+t			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹				
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	530.441	851.665	1445.192	561.676				
Maksimalna sila u stabilisućem kablu [kN]	233.728	283.014	673.351	158.837				
Pomeranja u odnosu na projektovani položaj [m]	-0.0899	0.0836	0.2922	0.1214				
(11) faza opterećenja					g-w-t			
Nenapregnuti štapovi	Ne	Ne	Ne	Neki dijag. ²				
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	439.825	685.507	1053.807	232.741				
Maksimalna sila u stabilisućem kablu [kN]	355.455	411.798	983.680	320.191				
Pomeranja u odnosu na projektovani položaj [m]	-0.3637	-0.3029	-0.1896	-0.2860				
(12) faza opterećenja					g-w+t			
Nenapregnuti štapovi	Ne	Ne	Ne	Neki dijag. ²				
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	365.980	602.013	885.619	156.937				
Maksimalna sila u stabilisućem kablu [kN]	314.678	368.648	859.882	273.576				
Pomeranja u odnosu na projektovani položaj [m]	-0.2777	-0.2736	-0.1663	-0.2451				

¹ Dijagonalni štap koji povezuje oslonac stabilizujućeg kabla i noseći kabl, i svi štapovi koji su „paralelni” s njim.

² Dijagonalni štap koji povezuje oslonac nosećeg kabla sa stabilizujućim kablom, i svi štapovi uz niži oslonac, koji su „paralelni” s njim.

Table 4. Parameters important for the stability of analyzed cable trusses

	Sports Hall in Bellingham (England)	Transitory Warehouse in Shiphall (the Netherlands)	The Ice Rink in Hall in Johaneshov (Sweden)	Sports complex “Zdravlje” in Leskovac (Serbia)				
Reference position	Prestress							
Designed position	Prestress and self weight							
(1) load phase					g			
Non-stressed members	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹				
Maximum force in carrying cable [kN]	512.328	860.247	1159.645	405.023				
Maximum force in prestressing cable [kN]	276.156	338.104	852.455	210.725				
Displacement from the reference position [m]	0.1877	0.3442	0.1874	0.1320				
(2) load phase					g+s			
Non-stressed members	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹				
Maximum force in carrying cable [kN]	737.163	1118.094	1743.888	888.726				
Maximum force in prestressing cable [kN]	183.646	242.893	651.260	122.844				
Displacement from the reference position [m]	0.3514	0.3493	0.4542	0.2792				

(3) load phase		g+s-w			
Non-stressed members	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	
Maximum force in carrying cable [kN]	557.329	901.561	1507.784	581.215	
Maximum force in prestressing cable [kN]	255.994	321.174	751.785	179.239	
Displacement from the reference position [m]	0.0713	0.0523	0.2692	0.1038	
(4) load phase		g-w			
Non-stressed members	no	no	no	Some diag. ²	
Maximum force in carrying cable [kN]	402.156	661.550	967.364	194.286	
Maximum force in prestressing cable [kN]	335.104	398.773	911.259	296.851	
Displacement from the reference position [m]	-0.0886	-0.2949	-0.1784	-0.2663	
(5) load phase		g-t			
Non-stressed members	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	
Maximum force in carrying cable [kN]	540.863	880.818	1229.884	427.371	
Maximum force in prestressing cable [kN]	297.095	353.324	949.431	230.347	
Displacement from the reference position [m]	-0.0016	-0.0171	-0.0165	-0.0217	
(6) load phase		g+t			
Non-stressed members	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	
Maximum force in carrying cable [kN]	484.796	809.471	1090.078	382.892	
Maximum force in prestressing cable [kN]	254.204	299.668	814.646	191.480	
Displacement from the reference position [m]	0.018	-0.0255	0.017	0.0237	
(7) load phase		g+s-t			
Non-stressed members	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	
Maximum force in carrying cable [kN]	762.125	1136.690	1804.279	907.484	
Maximum force in prestressing cable [kN]	206.402	258.162	729.567	142.829	
Displacement from the reference position [m]	0.3308	0.3304	0.4293	0.2611	
(8) load phase		g+s+t			
Non-stressed members	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	
Maximum force in carrying cable [kN]	712.537	1072.279	1684.366	870.296	
Maximum force in prestressing cable [kN]	160.815	204.597	572.717	102.927	
Displacement from the reference position [m]	0.3723	0.3791	0.4797	0.2973	
(9) load phase		g+s-w-t			
Non-stressed members	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	
Maximum force in carrying cable [kN]	584.537	921.784	1571.237	601.161	
Maximum force in prestressing cable [kN]	279.125	336.372	829.982	199.658	
Displacement from the reference position [m]	-0.0531	0.040	0.2467	0.0861	
(10) load phase		g+s-w+t			
Non-stressed members	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	Some diag. ¹	
Maximum force in carrying cable [kN]	530.441	851.665	1445.192	561.676	
Maximum force in prestressing cable [kN]	233.728	283.014	673.351	158.837	
Displacement from the reference position [m]	-0.0899	0.0836	0.2922	0.1214	
(11) load phase		g-w-t			
Non-stressed members	no	no	no	Some diag. ²	
Maximum force in carrying cable [kN]	439.825	685.507	1053.807	232.741	
Maximum force in prestressing cable [kN]	355.455	411.798	983.680	320.191	
Displacement from the reference position [m]	-0.3637	-0.3029	-0.1896	-0.2860	
(12) load phase		g-w+t			
Non-stressed members	no	no	no	Some diag. ²	
Maximum force in carrying cable [kN]	365.980	602.013	885.619	156.937	
Maximum force in prestressing cable [kN]	314.678	368.648	859.882	273.576	
Displacement from the reference position [m]	-0.2777	-0.2736	-0.1663	-0.2451	

¹ Diagonal member connecting the support of the prestressing cable and the carrying cable, and all members "parallel" to it

² Diagonal member connecting the support of the carrying cable and the prestressing cable, and all members "parallel" to it

5.1 Analiza rezultata

Proračun konstrukcija koje su prikazane, pokazuje da nisu ispunjeni svi uslovi stabilnosti koji se pominju u literaturi i primenjuju u praksi.

– **Sportska hala u Bilinghamu (Engleska)** zadovoljava u pogledu maksimalnih zatežućih sila u nosećem kablju, ali u minimalnoj meri ne zadovoljava u pogledu sila u stabilišućem kablju (više za oko 1,5%), kao ni u pogledu pomeranja u odnosu na projektovani položaj konstrukcije (više za oko 7%). Takođe, pojasni noseći i stabilišući kablovi jesu zategnuti u svim fazama opterećenja, a dijagonalni štapovi su zategnuti samo u fazi prednapreznja, dok je u narednim fazama opterećenja svaki drugi štap nenapregnut.

– **Prolazni magacin u Šipholu (Holandija)** zadovoljava u pogledu maksimalnih zatežućih sila u nosećem i stabilišućem kablju, ali je na granici zadovoljenja u pogledu pomeranja u odnosu na projektovani položaj konstrukcije. Takođe, pojasni noseći i stabilišući kablovi su zategnuti u svim fazama opterećenja, a dijagonalni štapovi su zategnuti samo u fazi prednapreznja, dok je u narednim fazama opterećenja svaki drugi štap nenapregnut.

5.1 The analysis of the results

The calculations of the constructions which are presented here show us that they have not satisfied all stability conditions which were mentioned in literature and used in practice.

– **Sports Hall in Bilingham (England)** Considering the maximum stressing forces in the carrying cable the construction is satisfactory, but it is minimally unsatisfactory concerning the forces in the stabilizing cable (1.5% greater), as well as concerning the movements in relation to the projected position of the construction which are 7% increased. Stripe cables: the carrying and stabilizing ones are stressed in all loading phases, the diagonal ones are stressed only in the prestressing phase, whereas in the following loading phases only each second one is prestressed.

– **Transitory Warehouse in Shiphall (the Netherlands)** Considering the maximum stressing forces in the carrying and stabilizing cable the construction is satisfactory, but it is hardly satisfactory considering the movements in comparison with the projected position of the construction. Stripe cables: the carrying and stabilizing ones are stressed in all loading phases, the diagonal ones are stressed only in the prestressing phase, whereas in the following loading phases only each second one is prestressed.

Tabela 5. Kriterijumi stabilnosti i sračunati parametri analiziranih kablovskih rešetaka

	Sportska hala u Bilinghamu, Engleska	Prolazni magacin u Šipholu, Holandija	Ledena dvorana u Johaneshovu, Švedska	Sportski kompleks „Zdravlje” u Leskovcu, Srbija
Nenapregnuti štapovi	Da – dijagon.	Da – dijagon.	Da – dijagon.	Da - dijag.
Maksimalna sila u nosećem kablju kN	762.125	1136.690	1804.279	907.484
Faza opterećenja	(7) g+s-t	(7) g+s-t	(7) g+s-t	(7) g+s-t
¹ Maks. dozvoljena sila u nosećem kablju kN (maksimalna sila multiplikovana odgovarajućim parcijalnim koeficijentom)	1463	2100	3969	1996
² Kataloška računsa prekidna sila	1570	2390	3650	2277
Maksimalna sila u stabilišućem kablju kN	355.455	411.798	983.680	320.191
Faza opterećenja	(11) g-w-t	(11) g-w-t	(11) g-w-t	(11) g-w-t
⁽³⁾ Maks. dozvoljena sila u stabilišućem kablju kN (maksimalna sila multiplikovana odgovarajućim parcijalnim koeficijentom)	711	824	2164	640
⁽⁴⁾ Kataloška računsa prekidna sila	700	933	2500	615
Maks.pomeranje u odnosu na projek. položaj m	-0.3637	-0.3791	-0.4797	0.2860
Faza opterećenja	(11) g-w-t	(8) g+s+t	(8) g+s+t	(11) g-w-t
³ Maks.dozv.pomer. u odnosu na projekt. polož. m	0.227	0.257	0.277	0.200
⁴ Maks.dozv.pomer. u odnosu na projekt. polož. m	0.340	0.385	0.415	0.300

Prema efektivnim kriterijumima projektnih jačina kablova.

² Prema katalogu proizvođača kablova.

³ Prema našem pravilniku za noseće čelične konstrukcije – (L/300).

⁴ Prema EC-3 maksimalni ugib za čelične konstrukcije – (L/200).

Table 5. Stability criteria and computed parameters of the analyzed cable trusses

	Sports Hall in Bellingham (England)	Transitory Warehouse in Shiphall (the Netherlands)	The Ice Rink Hall in Johaneshov (Sweden)	Sports complex "Zdravlje" in Leskovac (Serbia)
Non-stressed members	yes – diag.	yes – diag.	yes – diag.	yes – diag.
Maximum force in carrying cable kN	762.125	1136.690	1804.279	907.484
load phase	(7) g+s-t	(7) g+s-t	(7) g+s-t	(7) g+s-t
¹ Maximum allowed force in carrying cable kN (maximal force multiplied by partial coefficient)	1463	2100	3969	1996
² Catalogue calculation breaking force	1570	2390	3650	2277
Maximum force in prestressing cable kN	355.455	411.798	983.680	320.191
load phase	(11) g-w-t	(11) g-w-t	(11) g-w-t	(11) g-w-t
⁽³⁾ Maximum allowed force in prestressing cable kN (maximal force multiplied by partial coefficient)	711	824	2164	640
⁽⁴⁾ Catalogue calculation breaking force	700	933	2500	615
Maximum displacement from the designed position m	-0.3637	-0.3791	-0.4797	0.2860
load phase	(11) g-w-t	(8) g+s+t	(8) g+s+t	(11) g-w-t
³ Maximum allowed displacement from the designed position m	0.227	0.257	0.277	0.200
⁴ Maximum allowed displacement from the designed position m	0.340	0.385	0.415	0.300

¹ According to effective criteria of design strength of cables

² According to the catalogue of the cable manufacturer

³ According to our regulations for steel structures – ($L/300$)

⁴ According to EC-3 maximal deflection for steel structures – ($L/200$)

– **Ledena dvorana u Johaneshovu (Švedska)** ne zadovoljava u pogledu maksimalnih zatežućih sila u nosećem kablju ($2,2 \cdot 1804,3 = 3969 \text{ kN}$, što je za oko 9% više od sile kidanja 3650 kN), ali zadovoljava u pogledu sila u stabilizujućem kablju. Ne zadovoljava ni u pogledu pomeranja u odnosu na projektovani položaj konstrukcije (sračunato maksimalno pomeranje je $0,48 \text{ m}$, a minimalni kriterijum pomeranja $L/200 = 0,415 \text{ m}$, što je za oko 16% više). Takođe, pojasni noseći i stabilizujući kablovi jesu zategnuti u svim fazama opterećenja, a dijagonalni štapovi su zategnuti samo u fazi prednaprežanja, dok je u narednim fazama opterećenja svaki drugi štap nenapregnut.

– **Sportski kompleks „Zdravlje” u Leskovcu (Srbija)** zadovoljava u pogledu maksimalnih zatežućih sila u nosećem kablju, dok u pogledu sila u stabilizujućem kablju, prekoračuje granicu iskorišćenosti za oko 4%. Pomeranja u odnosu na projektovani položaj konstrukcije $0,286 \text{ m}$ zadovoljava po EC-3, dok po našim propisima za metalne konstrukcije $L/300 = 0,200 \text{ m}$ (veći je od dozvoljenog za oko 43%). Pojasni noseći i stabilizujući kablovi jesu zategnuti u svim fazama opterećenja, a dijagonalni štapovi su zategnuti samo u fazi prednaprežanja, dok je u narednim fazama opterećenja svaki drugi štap nenapregnut.

Poređenjem veličine pomeranja čvorova dobijenih

– **The Ice Rink Hall in Johaneshov (Sweden)**

Considering the maximum stressing forces in the carrying cable the construction is unsatisfactory ($2,2 \cdot 1804,3 = 3969 \text{ kN}$ which is approximately 9% greater than the tearing force 3650 kN ; yet it is satisfactory considering the forces in the stabilizing cable. It is unsatisfactory considering the movements in relation to the projected position of the construction (the maximum calculated movement was $0,48 \text{ m}$, and the minimum criterion of displacement $L/200 = 0,415 \text{ m}$, which is approximately 16% greater). Stripe cables: the carrying and stabilizing ones are stressed in all loading phases, but the diagonal rods are stressed only in the prestressing phase, whereas in the following loading phases each second rod is unstressed.

– **Sport Complex „Zdravlje” in Leskovac (Serbia)**

Considering the maximum stressing forces in the carrying cable the construction is satisfactory, yet considering the forces in the stabilizing cable it is above the use limitations for approximately 4%. The movements in relation to the projected position of the construction of $0,286 \text{ m}$ are satisfactory according to EC-3, whereas according to our regulations for metal constructions $L/300 = 0,200 \text{ m}$ they are larger than allowed, for approximately 43%. Stripe cables: the carrying and the stabilizing one are stressed in all of the

primenom kombinovane analitičko-numeričke metode (Tabela 5) sa originalnim dostupnim rezultatima (Tabela 1), uočavaju se bitne razlike date u Tabeli 6.

loading phases, the diagonal rods are stressed only in the prestressing phase; whereas in the following loading phases each second rod is unstressed.

Comparing the results of movements values obtained using the combined analytical-numerical method (Table 5) with the original available results (Table 1) some very important differences were noticed. They are given in Table 6.

Tabela 6. Odstupanja sračunatih maksimalnih originalnih pomeranja i rezultata dobijenih programom „Cabl” analiziranih kablovskih rešetaka, izraženo u m

Table 6. Deviation of calculated maximal original displacements from the results obtained by the program “Cabl” of the analyzed cable trusses, in m

	Sportska hala u Bilinghemu, Engleska Sports Hall in Bellingham (England)	Prolazni magacin u Šipholu, Holandija Transitory Warehouse in Shiphall (the Netherlands)	Ledena dvorana u Johaneshovu, Švedska The Ice Rink Hall in Johaneshov (Sweden)	Sportski kompleks „Zdravlje” u Leskovcu, Srbija Sports complex “Zdravlje” in Leskovac (Serbia)
(2) faza opterećenja / load phase g+s				
Originalni rezultat-analitički metod ¹ Original result-analytical method ¹	0,530	0,400	0,430	0,204
Analiitičko-numerički metod (program „Cabl”) Analytical-numerical method (program “Cabl”)	0,351	0,349	0,454	0,279
Korekcija / Correction	0,179	0,051	0,024	0,075
Odstupanje / Deviation	50%	14,6%	5,3%	26,9%
(2) faza opterećenja / load phase g-w				
Originalni rezultat-analitički metod ¹ Original result-analytical method ¹	-0,280	-0,310	-0,180	-0,142
Analiitičko-numerički metod (program „Cabl”) Analytical-numerical method (program “Cabl”)	-0,089	-0,295	-0,178	-0,266
Korekcija / Correction	0,191	0,015	0,002	0,124
Odstupanje / Deviation	215%	5,1%	1,1%	46,6%

Osim za Sportski kompleks „Zdravlje”, gde je primenjen Transient Stiffness Method

¹ Except for the Sports complex “Zdravlje” where Transient Stiffness Method is applied

Velika odstupanja u odnosu na analitičku metodu moguća su zbog aproksimacija koje se uvode prilikom rešavanja analitičkih jednačina, kao i mogućih grešaka u rasporedu štapova ispune (formiran model ne odgovara stvarnoj konfiguraciji štapova ispune nosača). Kod objekata u Holandiji i Švedskoj odstupanja su zanemarljiva. Veća odstupanja kod objekata u Engleskoj i Srbiji mogu da se pripišu neverodostojnom i nelogičnom podatku iz literature (Tabela 1, [14, 10]).

Primena kombinovane analitičko-numeričke metode ukazala je na to da se brže i jednostavnije dolazi do rezultata proračuna kablovskih rešetaka primenom programa „Cabl”. Ne pojavljuju se singularna matrica i prekid proračuna, jer su početni parametri koji se koriste u prvoj iteraciji Transient Stiffness Method dovoljno tačni da se proračun uvede u dalji iterativni postupak. Korišćenjem analitičkog metoda prof. Balgača, kontrola sile prethodnog naprezanja svedena je na ekvivalent dodatnog gravitacionog opterećenja, što umnogome pojednostavljuje analizu ovih nosača.

If compared with the analytical method, greater deviations are possible because of the approximations which were introduced while solving the analytical equations, as well as because of the possible errors in the distribution of filling rods (the model which was formed does not correspond to the real configuration of the girder’s nodes and members configuration). The deviations are insignificant in the structures in the Netherlands and Sweden. Greater deviations in the constructions in England and Serbia might be caused by the inauthentic and illogical data from literature (Table1, [14, 10]).

The use of the combined analytical-numerical method proved that it is much easier to obtain calculation results of cable trusses applying programme “Cabl”. There are no singular matrices and calculation interruptions since the initial parameters used in the first iteration of the Transient Stiffness Method are enough accurate so that the calculation can be proceeded into the following iterative procedure. Using the analytical method of professor Balgac, the control of the

6 ZAVRŠNE NAPOMENE, ZAKLJUČCI I PREPORUKE

Analizom nekoliko karakterističnih konstrukcija kablovskih rešetaka, došlo se do određenih zaključaka:

- opravdana je upotreba analitičko-numeričkog metoda za analizu ovog tipa konstrukcija (korekcije sila i pomeranja analitički dobijenih parametara vrlo su male [1, 12, 13]).

- Transient stiffness metodom preračunate su sile i pomeranja za dvanaest slučajeva statičkog opterećenja i izvedeno je poređenje s važećim kriterijumima stabilnosti. Utvrđeno je da se u skoro sva četiri analizirana slučaja konstrukcija javljaju u manjoj ili većoj meri prekoračenja maksimalne sile u nosećem ili stabilišućem kablju, nenapregnuti štapovi dijagonala u nekim od slučajeva opterećenja, kao i pomeranja veća od dozvoljenih.

- Nenapregnutost štapova ispune u pojedinim fazama opterećenja dovodi do veće horizontalne pomerljivosti i mogućeg vitoperenja nosača u vertikalnoj ravni. Vitoperenje nosača može da dovede do veće horizontalne pomerljivosti i stvaranje uslova za rezonantne efekte. Krovni nosači uglavnom ispunjavaju kriterijume statičke stabilnosti, ali se iz aspekta postizanja dinamičke stabilnosti postavlja pitanje dovoljne sile prednaprezanja kako bi se zadovoljili kriterijumi 2.e [3, 11-14].

S obzirom na duži period eksploatacije ovih objekata i osavremenjene kriterijume stabilnosti, a imajući u vidu prezentirane rezultate, nameće se potreba procene stabilnosti i bezbednosti korišćenja ovih objekata. Preporuke autora ovog rada jesu:

- Makroskopski detaljni pregled kablovskih struktura u pogledu mehaničkih i hemijskih oštećenja nosećih i spojnih elemenata;

- Precizno utvrđivanje trenutne geometrije nosača pod stalnim opterećenjem geodetskim metodama;

- Realni statički i dinamički uticaji (opterećenja) koji deluju na krovnu površinu;

- Ispitivanjem utvrditi deformacije usled probnog opterećenja i svojstvene vibracije kablovskih nosača;

- Sprovesti ponovnu statičku analizu za utvrđene realne uticaje na osnovu geodetskog snimka konfiguracije nosača i karakteristika kablova;

- Izvršiti dinamičku analizu uticaja vetra za lokalne uslove i mogućnost pojave rezonance [1];

- Izvesti konačan zaključak u pogledu ispunjenja kriterijuma stabilnosti a-e iz odeljka 2 ovog rada.

prestressing forces is reduced to the equivalent of the additional gravity loading, which makes the analysis of the girders much more simple.

6 FINAL REMARKS, CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Having analyzed several characteristic constructions consisting of cable trusses some specific conclusions were made:

- The use of analytical-numerical method for analyzing this type of constructions is justified. (Movements and forces corrections of analytically obtained parameters are very small) [1, 12, 13]

- Using the Transient Stiffness Method the forces and displacements in 12 cases of static loadings were calculated and compared to the already updated stability criteria. It was determined that in all of the four analyzed structures there were some exceed of the maximum forces either in the carrying or in the stabilizing cable, that there were some unstressed diagonal rods in some loading cases, and that there were some movements greater than the allowed ones.

- The unstressed filling rods in some loading cases cause greater horizontal movability and possible bending of a girder in the vertical plane. The bending of a girder can cause a larger horizontal movability and make conditions for resonance effects. Roof girders satisfy the criteria in most of the cases. However, concerning the aspects of reaching dynamic stability there is a problem of the sufficient prestressing force so that the criteria could be fulfilled.

Bearing in mind that the buildings have been used for quite long period of time, that stability criteria were updated and all the results were presented in the paper, it is necessary to estimate their stability properly as well as their safe use. The authors' recommendations are:

- Macroscopic detailed examination of cable structures concerning mechanic and chemical damages in the carrying and connecting elements,

- Precise estimation of girders' geometry under constant loading using geodetic methods

- Estimating real static and dynamic influences (loadings) which affect the roof surface,

- Measuring deformations caused by experimental loading and own vibrations of cable girders,

- Making repeated static analysis for estimation of real influences based on the geodetic estimation of girders' and characteristic cables' configuration,

- Making dynamic analysis of the influence of wind gusts for the local position and possible occurrence of resonance [1],

- Drawing final conclusion on the fulfillment of updated stability criteria (a-e from Chapter 2 of the Paper).

7 LITERATURA REFERENCES

- [1] Aćić M., Vlajić Lj., Kostić D.: Determination of prestressing levels for cable trusses as function of their stability, Građevinar, Vol. 12, 2013.
- [2] Aćić M., Vlajić Lj., Kostić D.: Eksperimentalna analiza dvopojasne lančanice konstrukcije visećeg krova SRC „Zdravlje” u Leskovcu, VII Simpozijum DGKM Ohrid, 1997., ST3 str.1–6.
- [3] AISI Manual for Structural Applications of Steel Cables for Buildings, 1996.
- [4] Balgač Edmund: Obešeni krov velike izložbene hale leskovačkog sajma tekstila, Betonske prednapregnute konstrukcije, Izgradnja (spec.izd.), 1969.
- [5] Balgač Edmund: Određivanje sila u kablovima prethodno napregnute mreže obešenih krovova oblika hiperboličkog paraboloida, Izgradnja, 1969. (11, 12)
- [6] Balgač Edmund: Die neue Ausstellungshalle der Textilmesse in Leskovac, Beton und Stahlbetonbau, 1961.(7)
- [7] Balgač Edmund: Obešeni krov doma omladine i sportova u Zemunu, Izgradnja, 1971.(7)
- [8] Balgač Edmund: Hala za sport i rekreaciju u Subotici, Izgradnja, 1988.(4)
- [9] Gopčević Š., Brčić S., Žugić Lj.: Dinamička analiza kablova, Građevinski materijali i konstrukcije, godina LV – 2012, Vol. 55., str. 3–31.
- [10] Ivković M., Radojičić T., Prašćević Ž., Radojičić V.: Dvopojasna prethodno napregnuta lančanica plivačkog bazena „Zdravlje” Leskovac, Savetovanje: „Modeliranje, proračun i ispitivanje konstrukcija”, Niš, 1993.
- [11] Jawerth D., Schulz H.: Ein Beitrag zur Eigenschwingungen, windanfahenden Krafte und aerodynamischen Stabilitat bei hangenden Dachern, Der Stalbau, Berlin, Januar 1966.
- [12] Kostić Dragan: Prilog rešenju problema stabilnosti dvopojasnih lančaničnih sistema, doktorska disertacija, GAF Niš, 2007.
- [13] Kostić D.: Stabilni dvopojasni lančanični sistemi, Zadužbina Andrejević, Beograd, 93 str., 2013.
- [14] Krishna Prem: Cable-Suspended Roofs, McGraw Hill Book Company, 1978.
- [15] Lewis W.J.: Tension Structures, Form and behaviour, Thomas Telford, Reston, 201 str., 2003.
- [16] Mladžov Rumen: Viseći konstrukcii, Tehnika, Sofija, 1987.
- [17] Moskalev N. S.: Konstrukcii visjačih pokritia, Stroizdat, Moskva, 1980.
- [18] Sobotka Zdenek: Zavešené strechy, Státní Nakladatelství Technické Literatury, Praha, 1962.
- [19] Milošević V. Dependence of membrane deflection on the position and intensity of point loads. Structural Engineering International, Vol. 2015, No. 1, 2015, pp. 20–25

REZIME

ANALIZA STABILNOSTI NEKIH IZVEDENIH KABLOVSKIH REŠETAKA

*Dragan KOSTIĆ
Vuk MILOŠEVIĆ*

U ovom radu prikazani su i analizirani primeri izgrađenih kablovskih rešetaka za pokrivanje velikih raspona, prema odabranim dostupnim podacima iz literature. Globalni odgovor konstrukcije na statička opterećenja, korišćenjem originalnog softvera kombinovanom analitičko-numeričkom metodom, pruža mogućnost dublje analize odabranih sistema. Tako dobijeni rezultati analizirani su iz aspekta kriterijuma stabilnosti, u odnosu na statička opterećenja (minimalne sile prednaprezanja, pojava nenapregnutih štapova, maksimalna pomeranja). Poređenjem dobijenih podataka s važećim kriterijumima stabilnosti, komentariše se trenutno stanje i formuliše se predlog za poboljšanje stabilnosti analiziranih kablovskih rešetaka.

Ključne reči: stabilnost, kablovske rešetke, transient stiffness metoda, force density metoda, dozvoljena pomeranja

SUMMARY

ANALIZA STABILNOSTI NEKIH IZVEDENIH KABLOVSKIH REŠETAKA

*Dragan KOSTIC
Vuk MILOSEVIC*

This paper is both a presentation and an analysis of some built cable trusses used for covering large spans according to some data which were selected and available from the literature. An overall response of a construction to static loadings applying the original software of the combined analytical-numerical method gives the possibility of a more comprehensive analysis of the chosen systems. The results obtained in this way were analyzed concerning stability criteria in relation to static loadings (minimum forces of prestressing, the occurrence of unstressed rods, exceeded displacement). Having compared the obtained data with the updated stability criteria we comment the present situation and suggest the ways of improving the stability of the cable trusses which were analyzed.

Key words: stability, cable trusses, transient stiffness method, force density method, allowed displacements

IN MEMORIAM

dr **LJUBOMIR VLAJIĆ**, dipl.inž.građ.
redovni profesor
1941-2015



Iznenada, 30. aprila 2015. godine u Beogradu, zauvek nas je napustio profesor dr Ljubomir M. Vlajić, diplomirani inženjer građevinarstva. Rođen je 15. oktobra 1941. godine u Beogradu. Diplomirao je na Konstruktivnom smeru Građevinskog fakulteta (GF) Univerziteta u Beogradu, jula 1966. godine, iz predmeta „Ispitivanje konstrukcija”. Ovo opredeljenje bilo je vodilja u njegovom celokupnom profesionalnom radu. Ljubomir Vlajić bio je nezaobilazan rukovodilac ispitivanja mnoštva građevinskih objekata, a poslednjih godina bio je angažovan kao konsultant pri ispitivanju značajnih objekata.

Nakon diplomiranja (1966) izabran je u zvanje asistenta na predmetu „Ispitivanje konstrukcija” na GF Univerziteta u Beogradu, gde je radio do 1970. godine. Posle toga radi u građevinskom preduzeću „Jedinstvo” iz Smederevske Palanke, kao glavni inženjer, a zatim i kao upravnik gradnje. U Institutu „Kirilo Savić” iz Beograda, od 1972. do 1982. godine, rukovodio je Odsekom za ispitivanje konstrukcija.

Na Građevinskom fakultetu u Subotici radi od septembra 1982. godine do septembra 2007. godine. Počeo je u zvanju predavača da bi napredovao do redovnog profesora. Značajno je pomenuti da od 1991. godine, paralelno s radom na fakultetu, aktivno radi kao naučni savetnik iz oblasti ispitivanja konstrukcija u Institutu „Kirilo Savić”. Doktorsku disertaciju „Ponašanje spojeva sa visokovrednim zavrtnjima pri eksploatacionom i graničnom opterećenju” odbranio je na Građevinskom fakultetu u Nišu, jula 1993. godine. Iste godine izabran je u zvanje vanrednog profesora, a u zvanje redovnog profesora izabran je 1999. godine na

GF Subotica, za grupu predmeta „Eksperimentalna analiza konstrukcija” i „Statika linijskih nosača 1”. Od septembra 2007. do 2015. godine radio je kao naučni savetnik u Saobraćajnom institutu CIP iz Beograda.

Pored ispitivanja konstrukcija, naučni i stručni rad profesora Vlajića obuhvatao je veoma široku problematiku građevinskog konstrukterstva, gde između ostalog spadaju: projektovanje, primena i kontrola visokovrednih zavrtnjeva, dijagnostika stanja, sanacije konstrukcija nakon teških oštećenja nastalih ekstremnom upotrebom objekata, kao i nakon ratnih razaranja. Bio je član komisije za mostove Ministarstva za infrastrukturu i energetiku Republike Srbije. U svojim radovima profesor Vlajić se zalagao da se rešavanje konstruktivnih problema na objektima zasniva na jedinstvu teorijske i eksperimentalne analize. Njegovi radovi praćeni su ne samo savremenim metodama ispitivanja, već i savremenim metodama proračuna konstrukcija.

Tokom celog svog radnog veka uspešno je povezivao stručni i naučnoistraživački rad, čime je dao svoj puni doprinos i struci i nauci. Posebnu pažnju posvećivao je radu na obrazovanju i napretku svojih mlađih saradnika i studenata, kao i kolega iz struke, što ukazuje na to da je pored stručno-naučnih kvalifikacija posedovao i poseban afinitet za pedagoški rad sa studentima, kao i rad na stručnom usavršavanju mlađih saradnika. Zapažena su njegova izlaganja na stručno-naučnim skupovima na kojima je često nastupao s pozivnim referatima. Pri tome je izlagao svoja bogata iskustva, a odlikovali su ga i kritički duh i objektivnost.

Kao priznanje za njegov značajan doprinos široj oblasti građevinskog konstrukterstva, 2008. godine izabran je za redovnog člana Jugoslovenske inženjerske akademije (sada Inženjerske akademije Srbije). Profesor Vlajić bio je aktivan u više stručnih i naučnih udruženja s brojnim referatima koje su organizovali Savez građevinskih inženjera Srbije, Društvo za istraživanje materijala i konstrukcija (DIMK), i Društvo građevinskih

konstruktera Srbije i ranije Jugoslavije. Učestvovao je, ne samo u radu, već i u organizovanju više naučno-stručnih skupova, a smrt ga je zadesila u vreme kada je bio član Programskog odbora Konferencije: Ocena stanja, održavanje i sanacije građevinskih objekata, a za Konferenciju: Savremena građevinska praksa, pripremio je i publikovano mu je saopštenje po pozivu, koje usled bolesti nije održao. To svedoči o njegovom neprestanom davanju doprinosa struci koju je istinski voleo.

Od najprepoznatljivijih stručnih rezultata profesora Vlajića ističu se statička i dinamička ispitivanja preko 400 različitih objekata kao što su: više mostova u Iraku, sportska hala „Beogradska Arena”, svi mostovi na pruzi Beograd–Bar, praktično svi mostovi preko reke Save i Dunava u Srbiji koji su izgrađeni od 1974. godine, uključujući novi most kod Beške i most Zemun–Borča, dok je za novi most preko Ade u Beogradu bio angažovan kao konsultant. Aktivno je radio na tehničkoj kontroli projekata.

Profesor Vlajić je bio i odgovorni projektant više desetina izvedenih kompleksnih objekata. Posle NATO bombardovanja 1999. godine, kao predsednik komisije za mostove, rukovodio je pripremom sanacija i obnovom 58 drumskih i železničkih mostova. Jedan od najznačajnijih projekata profesora Vlajića jeste glavni projektant sanacije i rekonstrukcije Palate „Ušće” na Novom Beogradu. Uspeh rekonstrukcije ovog objekta, između ostalog, ogleda se u ozbiljnosti i obimu oštećenja za koja su mnogi stručnjaci smatrali da su nepopravljiva i da objekat treba ukloniti. Društvo građevinskih konstruktera Srbije mu je za ovaj objekat dodelilo priznanje za najbolje ostvarenje u građevinskom konstrukterstvu za 2004. i 2005. godinu i nagradilo profesora Vlajića i članove tima s kojim je izveo pomenuti poduhvat. Na kongresu 2012. godine u

Juna 2015. godine

Vrnjačkoj Banji, Društvo građevinskih konstruktera Srbije profesoru Vlajiću dodelilo je Povelju za životno delo u oblasti građevinskog konstrukterstva.

Tokom rada na Građevinskom fakultetu Subotica intenzivno se bavio unapređivanjem predmeta „Eksperimentalna analiza konstrukcija” i „Dijagnostika stanja, održavanje, sanacija i revitalizacija konstrukcija” na diplomskim i poslediplomskim studijama. Učestvovao je u realizaciji eksperimenata u okviru magistarskih radova i doktorskih disertacija svojih kolega. Kao mentor rukovodio je izradom magistarskog rada i doktorske disertacije Ilije Miličića i doktorske disertacije Danijela Kukarasa.

Od publikacija posebno se ističe knjiga monografskog karaktera „Visokovredni zavrtnji u Građevinskom konstrukterstvu” (2012), koja predstavlja jedinstveni doprinos problematici standardne i nestandardne primene. Ovo delo je plod višedecenijskog iskustva autora u primeni, podržano eksperimentalnim analizama. U njoj su visokovredni zavrtnji tretirani ne samo kao spojno sredstvo, već i kao konstrukcijski element. Koautor je knjige „Mostovi”, koja je trajni podsetnik na razaranja infrastrukturnih objekata, koja su nas zadesila 1999. godine.

Profesor Vlajić se pored toga što je bio cenjen univerzitetski nastavnik, ubrajao u izuzetno darovite građevinske konstruktore širokog stručnog obrazovanja i interesovanja, a njegovi doprinosi u oblasti eksperimentalnog ispitivanja i istraživanja svrstavaju ga u naše vodeće stručnjake. Pominjemo i to da je često isticao kako je u svom radu imao značajnu podršku i razumevanje supruge Biljane, ćerke Milene i sina Milorada.

Radomir Folić
Danijel Kukaras

UPUTSTVO AUTORIMA*

Prihvatanje radova i vrste priloga

U časopisu Materijali i konstrukcije štampaće se neobjavljeni radovi ili članci i konferencijska saopštenja sa određenim dopunama ili bez dopuna, prema odluci Redakcionog odbora, a samo izuzetno uz dozvolu prethodnog izdavača prihvatice se i objavljeni rad. Vrste priloga autora i saradnika koji će se štampati su: originalni naučni radovi, prethodna saopštenja, pregledni radovi, stručni radovi, konferencijska saopštenja (radovi sa naučno-stručnih skupova), kao i ostali prilozi kao što su: prikazi objekata i iskustava - primeri, diskusije povodom objavljenih radova i pisma uredništvu, prikazi knjiga i zbornika radova, kao i obaveštenja o naučno-stručnim skupovima.

Originalni naučni rad je primarni izvor naučnih informacija i novih ideja i saznanja kao rezultat izvornih istraživanja uz primenu adekvatnih naučnih metoda. Dobijeni rezultati se izlažu kratko, jasno i objektivno, ali tako da poznavalac problema može proceniti rezultate eksperimentalnih ili teorijsko numeričkih analiza i tok razmišljanja, tako da se istraživanje može ponoviti i pri tome dobiti iste ili rezultate u okvirima dopuštenih odstupanja, kako se to u radu navodi.

Prethodno saopštenje sadrži prva kratka obaveštenja o rezultatima istraživanja ali bez detaljnih objašnjenja, tj. kraće je od originalnog naučnog rada. U ovu kategoriju spadaju i diskusije o objavljenim radovima ako one sadrže naučne doprinose.

Pregledni rad je naučni rad koji prikazuje stanje nauke u određenoj oblasti kao plod analize, kritike i komentara i zaključaka publikovanih radova o kojima se daju svi neophodni podaci pregledno i kritički uključujući i sopstvene radove. Navode se sve bibliografske jedinice korišćene u obradi tematike, kao i radovi koji mogu doprineti rezultatima daljih istraživanja. Ukoliko su bibliografski podaci metodski sistematizovani, ali ne i analizirani i raspravljani, takvi pregledni radovi se klasifikuju kao stručni pregledni radovi.

Stručni rad predstavlja koristan prilog u kome se iznose poznate spoznaje koje doprinose širenju znanja i prilagođavanja rezultata izvornih istraživanja potrebama teorije i prakse. On sadrži i rezultate razvojnih istraživanja.

Konferencijsko saopštenje ili rad saopšten na naučno-stručnom skupu koji mogu biti objavljeni u izvornom obliku ili ih autor, u dogovoru sa redakcijom, bitno preradi i proširi. To mogu biti naučni radovi, naročito ako su saopštenja po pozivu Organizatora skupa ili sadrže originalne rezultate prvi put objavljene, pa ih je korisno uz određene dopune učiniti dostupnim široj stručnoj javnosti. Štampaće se i stručni radovi za koje Redakcioni odbor oceni da su od šireg interesa.

Ostali prilozi su prikazi objekata, tj. njihove konstrukcije i iskustava-primeri u građenju i primeni različitih materijala, diskusije povodom objavljenih radova i pisma uredništvu, prikazi knjiga i zbornika radova, kao i obaveštenja o naučno-stručnim skupovima.

Autori uz rukopis predlažu kategorizaciju članka. Svi radovi pre objavljivanja se recenziraju, a o prihvatanju za publikovanje o njihovoj kategoriji konačnu odluku donosi Redakcioni odbor.

Da bi se ubrzao postupak prihvatanja radova za publikovanje, potrebno je da autori uvažavaju Uputstva za pripremu radova koja su navedena u daljem tekstu.

Uputstva za pripremu rukopisa

Rukopis otkucati jednostrano na listovima A-4 sa marginama od 31 mm (gore i dole) a 20 mm (levo i desno), u Wordu fontom Arial sa 12 pt. Potrebno je uz jednu kopiju svih delova rada i priloga, dostaviti i elektronsku verziju na navedene E-mail adrese, ili na CD-u. Autor je obavezan da čuva jednu kopiju rukopisa kod sebe zbog eventualnog oštećenja ili gubitka rukopisa.

Od broja 1/2010. prema odluci Upravnog odbora Društva i Redakcionog odbora, radovi sa pozitivnim recenzijama i prihvaćeni za štampu, publikovaće se na srpskom i engleskom jeziku.

Svaka stranica treba da bude numerisana, a optimalni obim članka na jednom jeziku je oko 16 stranica (30000 slovnih mesta) uključujući slike, fotografije, tabele i popis literature. Za radove većeg obima potrebna je saglasnost Redakcionog odbora.

Naslov rada treba sa što manje reči (poželjno osam, a najviše do jedanaeset) da opiše sadržaj članka. U naslovu ne koristiti skraćenice ni formule. U radu se iza naslova daju ime i prezime autora, a titule i zvanja, kao i ime institucije u podnožnoj napomeni. Autor za kontakt daje telefone, faks i adresu elektronske pošte, a za ostale autore poštansku adresu.

Uz sažetak (rezime) od oko 150 do 200 reči, na srpskom i engleskom jeziku daju se ključne reči (do deset). To je jezgrovit prikaz celog članka i čitaocima omogućuje uvid u njegove bitne elemente.

Rukopis se deli na poglavlja i potpoglavlja uz numeraciju, po hijerarhiji, arapskim brojevima. Svaki rad ima uvod, sadržinu rada sa rezultatima, analizom i zaključcima. Na kraju rada se daje popis literature.

Kod svih dimenzionalnih veličina obavezna je primena međunarodnih SI mernih jedinica.

Formule i jednačine treba pisati pažljivo vodeći računa o indeksima i eksponentima. Autori uz izraze u tekstu definišu simbole redom kako se pojavljuju, ali se može dati i posebna lista simbola u prilogu.

Prilozi (tabele, grafikoni, sheme i fotografije) rade se u crno-belom tehničkom formatu koji obezbeđuje da pri smanjenju na razmere za štampu, po širini jedan do dva stupca (8cm ili 16.5cm), a po visini najviše 24.5cm, ostanu jasni i čitljivi, tj. da veličine slova i brojeva budu najmanje 1.5mm. Originalni crteži treba da budu kvalitetni i u potpunosti pripremljeni za presnimavanje. Mogu biti i dobre, oštre i kontrastne fotokopije. Koristiti fotografije, u crno-belom tehničkom, na kvalitetnoj hartiji sa oštrim konturama, koje omogućuju jasnu reprodukciju. Skraćenice u prilogima koristiti samo izuzetno uz obaveznu legendu. Prilozi se posebno označavaju arapskim brojevima, prema redosledu navođenja u tekstu. Objašnjenje tabela daje se u tekstu.

Potrebno je dati spisak svih skraćenica korišćenih u tekstu.

U popisu literature na kraju rada daju se samo oni radovi koji se pominju u tekstu. Citirane radove treba prikazati po azbučnom redu prezimena prvog autora. Literaturu u tekstu označiti arapskim brojevima u uglastim zagradama, kako se navodi i u Popisu citirane literature, napr [1]. Svaki citat u tekstu mora se naći u Popisu citirane literature i obrnuto svaki podatak iz Popisa se mora navesti u tekstu.

U Popisu literature se navode prezime i inicijali imena autora, zatim potpuni naslov citiranog članka, iza toga sledi ime časopisa, godina izdavanja i početna i završna stranica (od - do). Za knjige iza naslova upisuje se ime urednika (ako ih ima), broj izdanja, prva i poslednja stranicapoglavlja ili dela knjige, ime izdavača i mesto objavljivanja, ako je navedeno više gradova navodi se samo prvi po redu. Kada autor citirane podatke ne uzima iz izvornog rada, već ih je pronašao u drugom delu, uz citat se dodaje «citirano prema...». Neobjavljeni članci mogu se pominjati u tekstu kao «usmeno saopštenje».

Autori su odgovorni za izneseni sadržaj i moraju sami obezbediti eventualno potrebne saglasnosti za objavljivanje nekih podataka i priloga koji se koriste u radu.

Ukoliko rad bude prihvaćen za štampu, autori su dužni da, po uputstvu Redakcije, unesu sve ispravke i dopune u tekstu i prilogima.

Za detaljnija tehnička uputstva za pripremu rukopisa autori se mogu obratiti Redakcionom odboru časopisa.

Rukopisi i prilozi objavljenih radova se ne vraćaju. Sva eventualna objašnjenja i uputstva mogu se dobiti od Redakcionog odbora.

Radovi se mogu slati i na e-mail: folic@uns.ac.rs ili miram@uns.ac.rs i dimk@ptt.rs

Već sajt Društva i časopisa: www.dimk.rs

* Uputstvo autorima je modifikovano i treba ga u pripremi radova slediti.

Izdavanje časopisa "Građevinski materijali i konstrukcije" finansijski su pomogli:



INŽENJERSKA KOMORA SRBIJE



**REPUBLIKA SRBIJA
MINISTARSTVO PROSVETE, NAUKE I
TEHNOLOŠKOG RAZVOJA**



**UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET**



**DEPARTMAN ZA GRAĐEVINARSTVO
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA NOVI SAD**



INSTITUT IMS AD, BEOGRAD



**UNIVERZITET CRNE GORE
GRAĐEVINSKI FAKULTET - PODGORICA**