



2010.
GODINA
LIII



MATERIJALI 2 I KONSTRUKCIJE

MATERIALS AND STRUCTURES

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



MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

MATERIALS AND STRUCTURES

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

IZDAVAČ:

Društvo za ispitivanje i istraživanje
materijala i konstrukcija Srbije

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK:

Prof. dr Radomir FOLIĆ, dipl.inž.,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

REDAKCIONI ODBOR:

Prof. dr Radomir FOLIĆ, dipl.inž.,
glavni i odgovorni urednik
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Prof. dr Mirjana MALEŠEV, dipl.inž.,
zamenik odgovornog urednika,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Prof. Lazar JOVANOVIĆ, dipl.inž.,
Beograd, Vrnjačka 9

Prof. dr Aleksandar PROKIĆ, dipl.inž.,
Građevinski fakultet, Subotica

Dr Ksenija JANKOVIĆ, dipl.inž.,
Institut IMS, Beograd

Dr Zoran BAČKALIĆ, dipl.inž.tehn.
"Polet", Novi Bečej

Mr Branislav VOJINOVIĆ, dipl.inž.,
Braće Ribnikar br. 15, Beograd

Dr Gordana Topličić-Čurčić, dipl.inž.
Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš

ADRESA REDAKCIJE:

Društvo za ispitivanje i istraživanje
materijala i konstrukcija Srbije
11000 Beograd, Kneza Miloša 9
Telefon: 011/3242-589

RECENZENTI:

Konačnu recenziju izvršio je Redakcioni odbor časopisa
na osnovu recenzentskih izveštaja

TEHNIČKI UREDNIK:

Stoja TODOROVIĆ

NASLOVNA STRANA:

Most na Adi Ciganliji - podizanje segmenta M2 iz rada
dr. Franka Minasa

TIRAŽ: 200 primeraka

Štampanje ovog broja pomogla je Inženjerska komora
Srbije.

Ovaj časopis primaju članovi Društva za ispitivanje i
istraživanje materijala i konstrukcija Srbije

PUBLISHER:

Society for Materials and Structures Testing
of Serbia

EDITOR AND CHIEF:

Prof. dr Radomir FOLIĆ, Civ.Eng.,
Faculty of Technical Science, Novi Sad

EDITORIAL BOARD:

Prof. dr Radomir FOLIĆ, Civ.Eng.,
editor and chief
Faculty of Technical Science, Novi Sad

Prof. dr Mirjana MALESEV, Civ.Eng.,
Faculty of Technical Science, Novi Sad

Prof. Lazar JOVANOVIĆ, Civ.Eng.,
Belgrade, Vrnjačka 9

Prof. dr Aleksandar PROKIĆ Civ.Eng.,
Faculty of Civil Engineering, Subotica

Dr Ksenija JANKOVIĆ, Civ.Eng.,
Institute IMS, Belgrade

Dr Zoran BAČKALIĆ, dipl.inž.tehn.
"Polet", Novi Bečej

Mr Branislav VOJINOVIĆ, dipl.inž.,
Braće Ribnikar br. 15, Beograd

Dr Gordana Toplicic-Curcic, Civ.Eng.,
Faculty of Civil Engineering and Architecture, Niš

THE ADDRESS OF THE EDITORIAL-STAFF:

Society for Materials and Structures Testing of Serbia
11000 Belgrade, Kneza Miloša 9
Telephone: 381 11/3242-589

REVIEWERS:

The review of papers done by the Editorial Board on the
reviewer's report

TECHNICAL EDITOR:

Stoja TODOROVIĆ

COVER:

Ada Ciganlija bridge - erection of segment M2 from paper
Dr Frank Minas

CIRCULATION: 200 examples

This number was published thanks to the financial support
of the Engineering Chamber of Serbia.

This Journal receive all the members of Society for
Materials and Structures Testing of Serbia

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

MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

MATERIALS AND STRUCTURES

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

SADRŽAJ

Ljiljana ŽUGIĆ Stanko BRČIĆ SUDAR SUSJEDNIH NESIMETRIČNIH VIŠESPRATNIH ZGRADA USLED UTICAJA ZEMLJOTRESA Originalni naučni rad	3
Miomir MILJKOVIĆ FUNDAMENTALNE KARAKTERISTIKE ASFALJNIH MEŠAVINA U POGLEDU OTPORNOSTI NA TRAJNU DEFORMACIJU Pregledni rad	23
Ratko MITROVIĆ ZABORAVLJENE TEHNOLOGIJE GRAĐENJA Stručni rad	38
Damir ZENUNOVIĆ Radomir FOLIĆ POUZDANOST AB MONTAŽNIH VEZA Pregledni rad	47
Uputstvo autorima	71

CONTENTS

Ljiljana ZUGIĆ Stanko BRCIĆ POUNDING OF ADJACENT NON-SYMMETRIC MULTISTORY BUILDINGS DUE TO AN EARTHQUAKE Original scientific paper	3
Miomir MILJKOVIC FUNDAMENTAL ASPHALT MIXTURES CHARACTERISTICS REGARDING PERMANENT DEFORMATION RESISTANCE	23
Ratko MITROVIC FORGOTTEN CONSTRUCTION TECHNOLOGIES Professional paper	38
Damir ZENUNOVIC Radomir FOLIC RELIABILITY OF RC PRECAST JOINT Review paper	47
Preview Report	71

CIP - Katalogizacija u publikaciji Narodna biblioteka Srbije, Beograd 620.1(497.11)

ISSN 0543-0798 = Materijali i konstrukcije (Beograd) COBISS.SR-ID 6725890

Štampa: Štamparija "Hektor Print" - Novi Beograd

SUDAR SUSJEDNIH NESIMETRIČNIH VIŠESPRATNIH ZGRADA USLED UTICAJA ZEMLJOTRESA

POUNDING OF ADJACENT NON-SYMMETRIC MULTISTORY BUILDINGS DUE TO AN EARTHQUAKE

Ljiljana ŽUGIĆ
Stanko BRČIĆ

ORIGINALNI NAUČNI RAD
UDK: 699.841 = 861

1 UVODNE NAPOMENE

Mnogi gradovi u svijetu izgrađeni su po sistemu takozvanih "kontinualnih sistema zgrada" gdje se svaka zgrada obično sa dvije suprotne strane oslanja na susjedne zgrade. U Solunu u Grčkoj postoje čak tri gradska bloka u kojima nema dilatacionih razdjelnica između susjednih zgrada, [3]. Dilatacione razdjelnice između susjednih zgrada su potrebne da bi se: obezbijedio slobodan prostor unutar koga zgrade mogu vibrirati u slučaju pojave zemljotresa i omogućilo nesporazumno širenje zgrada usled sezonskih temperaturnih uticaja. Svi savremeni tehnički propisi zahtijevaju dilatacionu razdjelnicu između susjednih zgrada. Međutim, to nije lako primjeniti jer postoji jako protivljenje od strane vlasnika (investitora), izvođača i inženjera, [2]. To je posledica: visoke cijene placeva, težnje da se dobije što veći korisni prostor, a time i što veći profit, teškoće pri izvođenju dilatacionih razdjelnica (izvođačima radova najviše odgovara da postojeći zid susjedne zgrade bude spoljašnja oplata za zid nove zgrade), kao i problemi kasnijeg održavanja razdjelnica.

Da su susjedne zgrade izgrađene u skladu sa postojećim tehničkim propisima njihov sudar ne bi se nikada dogodio, jer one usled zemljotresa načelno vibriraju međusobno nezavisno. Međutim, ako se njihove relevantne dinamičke karakteristike (krutost, masa, prigušenje) bitno razlikuju susjedne zgrade neće vibrirati sinhrono i ako je pri tome dilataciona razdjelnica između

Dr Ljiljana Žugić, dipl.inž.građ.
Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Cetinjski put
bb, 81000 Podgorica, Crna Gora; e-mail: ljiljaz@ac.me
Prof. dr Stanko Brčić, dipl.inž.građ.
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja
Aleksandra 73, 11000 Beograd,
e-mail: stanko@grf.bg.ac.rs

1 INTRODUCTION

Many towns in the world are built according to the so-called "continuous buildings system" where buildings are virtually connected, usually on both lateral sides, even though the lateral walls for two buildings are not the same. In Thessaloniki, Greece, there are even three city blocks without any seismic separation between buildings, [3]. Dilatation joints between buildings are necessary in order to provide the empty space where building may freely vibrate in the case of an earthquake and also to provide unrestricted thermal dilatation due to seasonal climate conditions. All current building codes require the existence of dilatation joint between neighboring buildings. However, it is not easy to implement sufficient separation distances in every case, because of a strong opposition of the owners (or investors) and also contractors, [2]. It is due to high prices of construction lots, strong tendency to obtain as much usefull area as possible, and therefore as much profit as possible, and also due to difficulties in practical implementation of dilatation joints (construction engineers much more prefer to use the existing wall of the neighboring building as the outer form for the new wall) and also latter maintenance of the expansion joint.

If the two adjacent building were built strictly according to technical building codes, the pounding between buildings would have never happened: they would vibrate during earthquakes independently from each other. If the

Dr Ljiljana Žugic, dipl.civ.eng.
University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering,
Cetinjski put bb, 81000 Podgorica, Crna Gora;
e-mail: ljiljaz@ac.me
Prof. dr Stanko Brcic, dipl.civ.eng.
University in Belgrade, Faculty of Civil Engineering,
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Belgrade,
e-mail: stanko@grf.bg.ac.rs

njih nedovoljnih dimenzija može doći do njihovog sudara. Iskustva stečena poslije mnogih većih zemljotresa pokazuju da se sudar susjednih zgrada izloženih ovoj prirodnoj pojavi zaista događa, [3], [5] i [13]. Poslije rušenja stepenišnog tornja bolnice "Olive View Hospital" u Kaliforniji usled sudara sa glavnom zgradom bolnice za vrijeme zemljotresa "San Fernando" 1971. godine praktično i započinje razmatranje problema sudara zgrada, [5]. Intenzivnije se počinje raditi na ovom problemu poslije zemljotresa u Mexico City 1985. godine kada se srušio neuobičajeno veliki broj zgrada, a u nekim slučajevima glavni uzrok rušenja je bio sudar susjednih zgrada, [13]. Od 330 višespratnih zgrada koje su bile znatno oštećene ili se srušile za vrijeme tog zemljotresa, sudar sa susjednim objektima desio se u preko 40% slučajeva, dok je 15% od svih slučajeva doveo do rušenja, [2].

Analiza mogućeg sudara zgrada za vrijeme zemljotresa je složena i nedovoljno ispitana oblast primjenjene mehanike. Numerička i analitička istraživanja tog problema su relativno rijetka. U osnovi postoje dva pristupa u analizi. Prvi se zasniva na uvođenju posebnih linearno viskozno - elastičnih "udarnih" elemenata između dvije susjedne zgrade koji se aktiviraju tek po ostvarivanju kontakta između dvije vibrirajuće mase, [1], [4] i [15]. Pri tome se krutosti ovakvih udarnih elemenata usvajaju u relativno velikom iznosu (znatno većem od krutosti zgrada), čime se simuliraju udarne sile, dok je konstanta viskozno prigušenja određena prema procjeni disipacije energije tokom sudara, dovođenjem u korelaciju sa koeficijentom sudara. U radu [15] zgrade su tretirane kao ekvivalentni sistemi sa po jednim stepenom slobode, dok je u radovima [1] i [4] dat napredniji pristup gdje su zgrade tretirane kao sistemi sa više stepeni slobode. U drugom pristupu uslovi ostvarivanja sudara između pojedinih dijelova zgrada se nameću kao ograničenja jednačinama kretanja zgrada primjenom metode Lagranževih multiplikatora veza, [14]. U svim ovim radovima zgrade su tretirane kao simetrični sistemi, gdje svaka tavanica vrši samo translatorno kretanje sa jednim stepenom slobode.

U ovom radu prikazana je analiza mogućeg sudara višespratnih nesimetričnih zgrada usled dejstva zemljotresa. Zgrade su tretirane kao trodimenzionalni sistemi, gdje svaka tavanica vrši ravno kretanje u svojoj horizontalnoj ravni sa po tri stepena slobode (translacije u i v i rotacija j), kao što je prikazano u radu [12]. Dakle, zgrada sa N spratova ima $3N$ stepeni slobode kretanja. Korišćen je pristup koji je u osnovi radova [6] i [7], gdje je analiziran mogući sudar jednospratnih nesimetričnih susjednih zgrada. Mogući sudar zgrada analiziran je kombinacijom direktne numeričke integracije u vremenskom domenu korak po korak i klasične analize sudara dva kruta tijela pri ravnom kretanju.

relevant building's dynamic properties (stiffness, mass and damping) are substantially mutually different, then adjacent buildings will not vibrate in phase (in synchronous fashion), and if the separation distance is insufficient, then the pounding may occur. Experiences from many major earthquakes show that pounding of neighboring buildings is really happening, see [3], [5] or [13]. After the collapse of the staircase tower of the "Olive's View Hospital", due to collisions of the tower with the main building of the hospital during the San Fernando earthquake in 1971, the analysis of the pounding of buildings, as a subset of earthquake engineering, practically started, [5]. More intensive analysis of pounding started after the Mexico City earthquake in 1985, where the rather substantial number of buildings was heavily damaged or crushed down and in some cases the main reason for demolition was attributed to pounding, [13]. Out of about 330 relatively multi-story buildings that were heavily damaged or demolished during that earthquake, pounding with neighboring buildings occurred in more than 40% of cases, while in 15% of demolition the pounding was direct cause, [2].

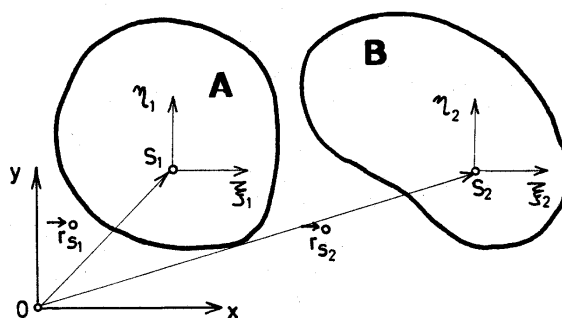
Analysis of the possible pounding of buildings during earthquake is a rather complicated and still unexplored field of the applied mechanics. Numerical and analytical investigations of that problem are relatively rare. In the essence there are two main approaches to that problem. One is based on the introduction of the special linear visco-elastic impact elements between two adjacent buildings, that are being activated after the contact of the two vibrating masses, [1], [4], [15]. The stiffness of such impact elements are assumed as relatively high (much higher than the stiffness of the buildings), so the impact forces are being simulated, while the viscous damping is estimated according to evaluation of dissipation of energy during collision, by assuming some correlation with the impact coefficient. In [15] buildings are treated as the equivalent single-degree-of-freedom systems, while in [1] and [4] the buildings are considered as multi-degree-of-freedom systems. In the other approach the conditions of the contact-impact problem between certain parts of neighboring buildings are imposed as restrictions of the differential equations of motion by the Lagrange multiplier method, [14]. In all of this papers buildings are treated as symmetric systems, where each slab is performing only a translation with one degree of freedom.

This paper is presenting the analysis of the possible pounding of multi-story non-symmetric buildings in the event of an earthquake. Buildings are treated as trodimenzionalni sistemi, where each floor slab is performing the planar motion in its horizontal plane, with three degrees of freedom each (translations u and v and rotation φ), as shown in [12]. Therefore, a building with N stories has $3N$ degrees of freedom. The approach used here is based upon the approach presented in [6] and [7], where the possible pounding of single-story non-symmetric buildings was analyzed. The possible pounding is analyzed by the combination of direct numerical integration in the time domain step-by-step and the classical impact analysis of the two rigid bodies in planar motion.

2 MOGUĆI SUDAR TAVANICA ISTOG NIVOA SUSJEDNIH ZGRADA

Usled uticaja zemljotresa susjedne zgrade istih spratnih visina, izgrađene u skladu sa postojećim tehničkim propisima, načelno vibriraju nezavisno. Međutim, ako se njihove relevantne dinamičke karakteristike bitno razlikuju i ako je dilataciona razdjelnica između njih nedovoljnih dimenzija može da dođe sudara tavanica susjednih zgrada na istom visinskom nivou.

Na slici 1 prikazane su tavanice A i B istog nivoa susjednih nesimetričnih zgrada. Za opisivanje položaja tavanica tokom njihovog ravnog kretanja usvojeni su referentni (globalni) koordinatni sistem Oxy i materijalni (lokalni) koordinatni sistemi $S_1\xi_1\eta_1$ i $S_2\xi_2\eta_2$, postavljeni u centru masa posmatranih tavanica. U početnoj konfiguraciji (prije pojave zemljotresa) lokalni sistemi su paralelni sa globalnim sistemom.



Slika 1. Tavanice istog nivoa susjednih nesimetričnih zgrada u početnoj konfiguraciji
Figure 1. Slabs at the same level of adjacent non-symmetric buildings in the initial configuration

Tavanice A i B, kao posledica uticaja zemljotresa, usled nastalog ravnog kretanja svake tavanice, u nekom trenutku vremena mogu da zauzmu jedan od sledećih međusobnih položaja: da nisu u kontaktu, da se dodiruju u jednoj tački i da se preklapaju. U prvom slučaju nema sudara tavanica. Ako je ostvaren kontakt između tavanica u jednoj tački to ne znači da je došlo do njihovog sudara, jer je ostvarivanje kontakta u jednoj tački samo potreban ali ne i dovoljan uslov sudara tavanica. Moguće je da su tavanice tokom kretanja ostvarile kontakt u jednoj tački, ali tako da su pri tome brzine tačaka dodira jedne i druge tavanice jednake nuli ili su takvih smerova koji ukazuju na međusobno razdvajanje tavanica u sledećem trenutku, pa zbog toga nema sudara tavanica, već je samo ostvaren kontakt. Ukoliko je došlo do preklapanja tavanica onda to znači da se sudar dogodio u nekom ranijem trenutku vremena koji treba odrediti.

2.1 Uslovi sudara tavanica

Potrebni i dovoljni uslovi sudara tavanica u nekoj tački Q tokom njihovog ravnog kretanja formulisani su kao:

- uslov sudara po položaju: ostvaren kontakt tavanica u jednoj tački,

2 POSSIBLE IMPACT OF SLABS AT THE SAME LEVEL OD ADJACENT BUILDINGS

In the case of an earthquake, neighboring buildings with the same story heights, built in accordance to technical building codes, will vibrate independently. However, if their relevant dynamic characteristics are substantially different and if the separation distance between them is insufficient, then it is quite possible that pounding between slabs at the same level will occur.

Fig. 1 is presenting two arbitrary slabs A and B at the same level of the two neighboring non-symmetric buildings. In order to describe slab positions during their planar motion the common global (inertial) coordinate system Oxy is adopted, as well as the two material (or local) coordinate systems $S_1\xi_1\eta_1$ and $S_2\xi_2\eta_2$, assumed in the center of mass of each slab. In the initial configuration (prior to the earthquake), local systems are parallel with the global one.

As a consequence of an earthquake, due to sudden beginning of the planar motion of slabs, at any instant of time the slabs A and B may occupy any of the following mutual positions: to be without any contact, to have a contact at a single point or to overlap with certain areas. In the first case there is obviously no impact between slabs. If the contact at a single point of the two slabs is established, it does not necessarily mean the the impact has occurred, because a contact at a point is just the necessary, but not the sufficient condition of an impact. Namely, it is possible that the contact at a point has occurred, but in such a way that the velocities of that common point of both slabs are either equal to zero, or with such senses as to indicate the separation of slabs at the next instance, so there is no impact, only connection. If the slabs are overlapping, it means that the impact has already occurred in some previous instant of time that has to be determined.

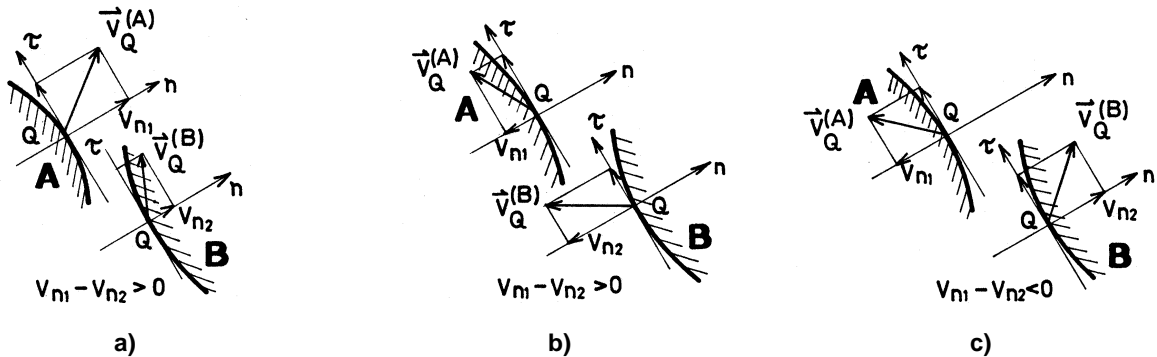
2.1 The conditions of impact of two slabs

The necessary and sufficient conditions of impact of the two slabs at some point Q, during their planar motion are formulated as:

- the position condition of impact: the contact of slabs is established at a single point,

- uslov sudara po brzinama: razlika projekcija brzina jedne i druge tavanice u tački ostvarenog kontakta u pravcu normale na konturu u tački dodira treba da ukazuje na tendenciju preklapanja tavanica u sledećem trenutku vremena, slika 2 (a i b - tendencija ka preklapanju tavanica, c - tendencija ka razdvajanju tavanica u sledećem trenutku vremena).

- the velocity condition of impact: the difference of projections of velocities of both slabs at the point of contact must be such to indicate the tendency of overlapping of slabs at the next instant of time, Fig. 2 (a,b - tendency to overlapping of slabs, c - tendency of separation of slabs at the next instant of time).



Slika 2. Uslov sudara izražen po brzinama
Figure 2. The velocity condition of impact

Ako se sa $\mathbf{r}_Q^{(A)}$ i $\mathbf{r}_Q^{(B)}$, odnosno sa $\mathbf{v}_Q^{(A)}$ i $\mathbf{v}_Q^{(B)}$, označe vektori položaja i brzine tačka Q tavanica A i B, koji se posmatraju u odnosu na isti prostorni koordinatni sistem i ako se sa $\hat{\mathbf{n}}$ označi ort spoljašnje normale na konturu jedne od tavanica onda se uslovi sudara tavanica, u vektorskom obliku, mogu prikazati kao:

If the vectors $\mathbf{r}_Q^{(A)}$ and $\mathbf{r}_Q^{(B)}$, and also $\mathbf{v}_Q^{(A)}$ and $\mathbf{v}_Q^{(B)}$, denote the position vectors and the velocity vectors of the point Q of both slabs A and B, expressed with respect to the same inertial (global) coordinate system and if $\hat{\mathbf{n}}$ denotes the unit vector of the outward normal with reference to the contour of one of the slabs, then the conditions of impact of slabs may be expressed in the vector form as:

$$\mathbf{r}_Q^{(A)} - \mathbf{r}_Q^{(B)} = 0 \quad (1)$$

$$(\mathbf{v}_Q^{(A)} - \mathbf{v}_Q^{(B)}) \cdot \hat{\mathbf{n}} > 0 \quad (2)$$

odnosno, u skalarnom obliku kao:

or, in the scalar form as:

$$x_Q^{(A)} - x_Q^{(B)} = 0 \quad y_Q^{(A)} - y_Q^{(B)} = 0 \quad (3)$$

$$v_{n1} - v_{n2} > 0 \quad (4)$$

Ako je $\hat{\mathbf{n}}$ ort spoljašnje normale na konturu tavanice A u tački Q onda je:

If $\hat{\mathbf{n}}$ is the ort of the outward normal with respect to the contour of slab A at the point Q, then

$$v_{n1} = \mathbf{v}_Q^{(A)} \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad \text{i} \quad v_{n2} = \mathbf{v}_Q^{(B)} \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad (5)$$

a ako je ort $\hat{\mathbf{n}}$ definisan kao spoljašnja normala za konturu tavanice B u tački Q, onda se v_{n1} odnosi na tavanicu B, a v_{n2} na tavanicu A:

and also, if $\hat{\mathbf{n}}$ is defined as the outer normal for the contour of the slab B at the point Q, then v_{n1} is referring to slab B and v_{n2} to slab A:

$$v_{n1} = \mathbf{v}_Q^{(B)} \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad \text{i} \quad v_{n2} = \mathbf{v}_Q^{(A)} \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad (6)$$

Vektor brzine neke tačke P tavanice proizvoljnog oblika, čije su materijalne koordinate date sa $P(\xi_P, \eta_P)$, po definiciji je:

The velocity vector of some point P of an arbitrary slab, whose material coordinates are given by $P(\xi_P, \eta_P)$, is given as:

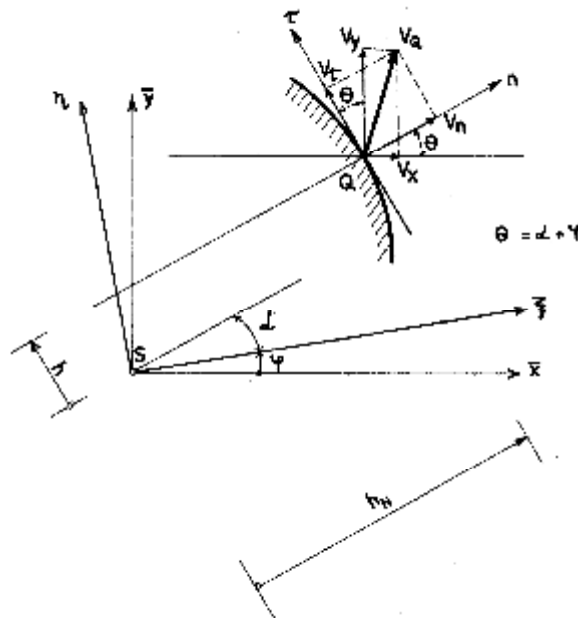
$$\mathbf{r}_{V_P} = \mathbf{r}_P = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \end{Bmatrix} + \varphi \begin{bmatrix} -\varphi & -1 \\ -1 & \varphi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_P \\ \eta_P \end{Bmatrix} \quad (7)$$

pri čemu su uzete u obzir sledeće aproksimacije: $\cos \varphi \approx 1$ i $\sin \varphi \approx \varphi$, imajući u vidu da su pomjeranja u i v i obrtanje tavanice φ male vrijednosti, dok je \mathbf{r}_P vektor položaja tačke P prikazan u radu [12].

Kako je tačka kontakta Q tačka na konturi tavanice, potrebno je odrediti brzine ove tačke u pravcima normale i tangente na konturnu liniju tavanice, kao što je prikazano na slici 3.

In Eq.(7) the approximations $\cos \varphi \approx 1$ and $\sin \varphi \approx \varphi$ are taken into account, having in mind that displacements u and v and slab rotation φ are small values, while \mathbf{r}_P is the position vector of point P shown in [12].

Since the point of contact Q is located on the contour of both slabs, it is necessary to determine the velocity components of that point with respect to the normal and tangent unit vectors defined for the contour of the slab, as presented in Fig. 3.



Slika 3. Vektor brzine u tački kontakta Q
Figure 3. Velocity vector of the point of contact Q

Ako je θ ugao između normale n i prostorne ose x onda su komponente brzine u odnosu na pravce normale i tangente na konturu tavanice u tački Q date sa:

If θ is the angle between the normal n and the global axis x , then the components of velocity vector with respect to normal and the tangent to the contour of the slab at the point Q are given by:

$$\mathbf{r}_{V_Q} = \begin{Bmatrix} v_n \\ v_\tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Kao što se vidi na slici 3, ugao θ jednak je zbiru uglova α i φ , pri čemu je α ugao između materijalne ose ξ i normale n i on je konstantan za datu konturnu tačku, dok je φ ugao između referentne ose x i materijalne ose ξ , tj. ugao rotacije tavanice.

As may be seen in Fig. 3, the angle θ is equal to the sum of angles α and φ , where α is the angle between the local (material) axis ξ and the normal n and for the given point Q it has a constant value, while φ is the angle between the global axis x and the local (material) axis ξ , i.e. it represents the angle of rotation of the slab.

Kada se u relaciju (8) unesu poznate komponente brzina tačke Q u odnosu na prostorni sistem date sa relacijom (7) dobija se:

When one inserts the known components of velocity of the point Q, expressed with reference to the global system and given by Eq.(7), into relation (8), one obtains:

$$\mathbf{r}_{v_Q} = \begin{Bmatrix} v_n \\ v_\tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h \\ h_N \end{Bmatrix} + \mathbf{e} \begin{Bmatrix} -h \\ h_N \end{Bmatrix} \quad (9)$$

gdje je:

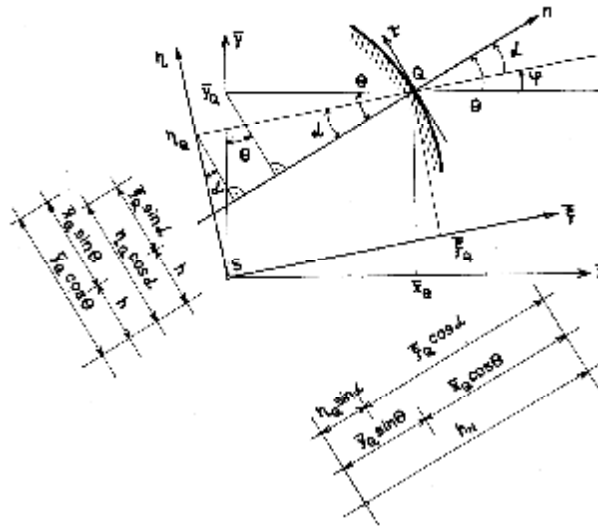
where:

$$h = -\xi_Q \sin\alpha + \eta_Q \cos\alpha \quad (10)$$

$$h_N = \xi_Q \cos\alpha + \eta_Q \sin\alpha \quad (11)$$

Na slici 4 prikazane su veličine h i h_N koje predstavljaju projekcije duži SQ na ose τ i n .

Fig. 4 presents the quantities h and h_N which represent the projections of the segment SQ on the axes τ and n .



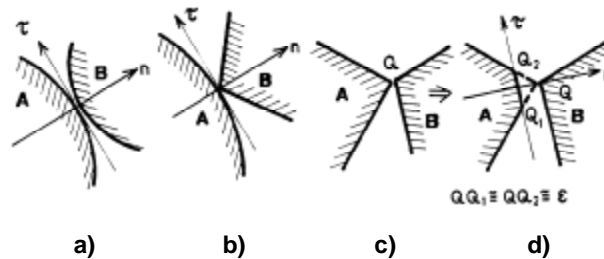
Slika 4. Geometrija konture tačke Q
Figure 4. Geometry of the contour point Q

U tački kontakta mora biti definisan, barem za jednu od tavanica, pravac normale na konturu da bi se mogle odrediti komponente brzine tačke kontakta u pravcu normale na konturu tavanice. Postoje razne situacije vezane za određivanje pravca normale na konturu u tački kontakta i prikazane su na slici 5. Tavanice mogu biti definisane kao glatke zatvorene konture ili kao poligonalne oblasti. Ako su obje tavanice sa glatkim konturama onda su tangenta i normala jednoznačno definisane za obje konture, slika 5a. Za tavanice poligonalnog oblika su moguće dvije situacije. Prva situacija je da tjemena jedne od tavanica bude u kontaktu sa glatkim dijelom konture druge tavanice, slika 5b. U ovom slučaju tangenta i normala su definisane u tački kontakta Q u odnosu na tavanicu sa glatkom konturom. Druga situacija je slučaj kontakta dva tjemena poligonalnih kontura tavanica, slika 5c. U ovom slučaju u tački kontakta nisu definisane tangenta i normala ni za jednu od tavanica. Tada se, kao inženjersko rješenje, tačka Q jedne od tavanica zamijeni sa dvije bliske tačke Q_1 i Q_2 koje su u maloj, odnosno ε okolini tačke Q na susjednim stranicama konture tavanice tj. $\overline{QQ_1} \cong \overline{QQ_2} \cong \varepsilon$, slika 5d. U ovom slučaju pravac tangente određen je pravcem Q_1Q_2 , pri čemu se usvaja smjer tangente u obilasku oko tavanice u smjeru

At the point of contact, at least for one of the slabs, direction of the outward normal n with respect of the contour must be defined in order to be able to determine the velocity components for the point of contact. There might be various situations related to determination of the direction of the outward normal, as presented in Fig. 5. The slabs may be defined as the smooth closed curves, or as the closed polygonal areas. If both slabs are with smooth contours, then the tangent and normal lines are uniquely defined for both contours, Fig. 5a. For the polygonal slabs two situations are possible. The first one is when the corner point of one slab is in a contact with the smooth part of the other slab, Fig. 5b. In this case the tangent and the normal are defined in the point of contact with reference to the smooth surface. The second situation is the contact of two corner points of polygonal slabs Fig. 5c. In this case, the normal and the tangent lines at the contact point are not defined for neither of the slabs. As the engineering approach, the corner point Q for one of the slabs is substituted with two close points Q_1 and Q_2 which are in some small, or ε surrounding of the point Q on neighboring sides of the contour, i.e. $\overline{QQ_1} \cong \overline{QQ_2} \cong \varepsilon$, Fig. 5d. In this case, the tangent is defined by direction Q_1Q_2 , with the sense adopted according to the counter-clock-wise direction.

suprotnom od kazaljke na satu. Ovo "odbacivanje" malog dijela tavanice moglo bi da se shvati kao deformisanje tjemena jedne od tavanica usled sudara.

This "cutting-off" of the small part of the slab might be considered as the deformation of the corner point of one slab due to an impact.



Slika 5. Tangenta i normala na konturu u tački sudara
Figure 5. Tangent and normal lines defined for the contour of the slab at the point of impact

2.2 Analiza sudara dvije tavanice

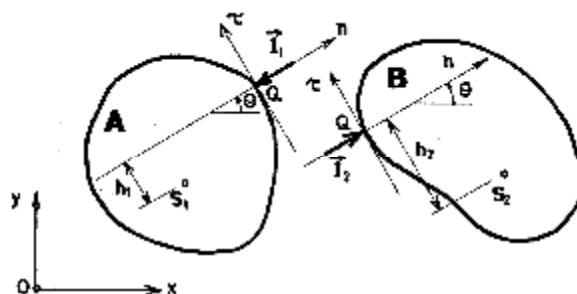
Tokom sudara, koji se ostvaruje unutar beskonačno kratkog intervala vremena, smatra se, a u skladu sa pristupom u klasičnoj mehanici, da nema pomjeranja ploča koje se nalaze u sudaru već samo da dolazi do nagle promjene njihovih brzina. U tački sudara javljaju se kao unutrašnje sile veze između ploča odgovarajuće udarne sile, koje su beskonačno velikog intenziteta i traju beskonačno kratko, jer one postoje samo tokom sudara, pa je samo njihov impuls konačna veličina. Za razliku od toga, impulsi svih ostalih "neudarnih sila" su beskonačno male veličine zbog njihovih konačnih intenziteta, a beskonačno kratkog vremenskog intervala. Eventualno trenje tokom sudara se zanemaruje, pa zbog toga udarne sile između ploča imaju pravac koji se poklapa sa normalom na konturu ploča, a suprotnog su smjera i istih intenziteta u skladu sa aksiomom akcije i reakcije.

Na slici 6 prikazane su razdvojene tavanice masa m_1 i m_2 tokom sudara i njihovi unutrašnji udarni impulsi \vec{I}_1 i \vec{I}_2 koji djeluju u pravcu normale \vec{n} , definisane u odnosu na jednu od tavanica, u tački sudara Q. Udarni impulsi su usmjereni uvijek tako da to odgovara pritisku na ploče, jer su u pitanju reakcije jednostranih (nezadržavajućih) veza, pa je $\vec{I}_1 = -I \vec{n}$, a $\vec{I}_2 = I \vec{n}$.

2.2 Impact analysis of two slabs

Duration of the impact is assumed to be infinitely small, according to the classical rigid body approach, and also, the main assumption is that there is no displacement during impact, only the sudden change in the velocity field. At the point of impact there are two internal impact forces between slabs, whose intensities are infinitely large, but their duration is infinitely small, because impact forces exist only during the impact, so only their impulses has the finite value. As opposed to that, impulses of all other "non-impact" forces are infinitely small, due to their finite intensities and infinitely small time interval. The possible friction forces during the impact are neglected, so the impact forces between slabs have the known direction coinciding with the normal to the contour line of the slabs and they are of the opposite senses and equal intensities due to the Law of Action and Reaction.

Fig. 6 presents two separated slabs, with masses m_1 and m_2 , during the impact and the corresponding internal impact impulses \vec{I}_1 and \vec{I}_2 whose line of action is the normal \vec{n} defined with reference to one of the slabs at the point of impact Q. Impact impulses are oriented in such a way that it corresponds to the pressure on the slabs, because impact forces are reaction forces of one-sided restrains, so $\vec{I}_1 = -I \vec{n}$ and $\vec{I}_2 = I \vec{n}$.



Slika 6. Razdvojene tavanice u toku sudara
Figure 6. Separated slabs during the impact

Sam proces sudara opisuje se pomoću zakona o promjeni količine kretanja i o promjeni momenta količine kretanja u konačnom obliku, koji su napisani za svaku razdvojenu tavanicu posebno (i=1, 2), neposredno poslije i neposredno prije sudara:

$$\dot{\mathbf{K}}_i'' - \dot{\mathbf{K}}_i' = \dot{\mathbf{I}}_i \quad (12)$$

$$\dot{\mathbf{D}}_i'' - \dot{\mathbf{D}}_i' = \dot{\mathbf{H}}_i = \mathbf{r}_i \times \dot{\mathbf{I}}_i \quad \Rightarrow \quad \mathbf{D}_i'' - \mathbf{D}_i' = \mathbf{H}_i \quad (13)$$

gdje su:

– $\dot{\mathbf{K}}_i = m_i \cdot \dot{\mathbf{v}}_i$ vektori količine kretanja tavanice (m_i je masa, a $\dot{\mathbf{v}}_i$ brzina centra mase tavanice i),

– $\dot{\mathbf{D}}_i = J_{\zeta_i} \cdot \dot{\phi}_i$ vektori momenta količine kretanja tavanice (komponente upravne na ravan tavanice), pri čemu je J_{ζ_i} centralni momenat inercije mase za osu upravno na tavanicu, a $\dot{\phi}_i$ ugaona brzina rotacije tavanice oko vertikalne ose,

– $\dot{\mathbf{I}}_i$ udarni impulsi između tavanica,

– \mathbf{H}_i impulsni momenti u odnosu na centre masa tavanica, tj. u odnosu na centralne ose upravne na tavanice ζ_i .

U relacijama (12) i (13) sa (...) su označene sve veličine neposredno prije sudara, a sa (...) sve veličine neposredno poslije sudara.

Ako se navedeni zakoni (12) i (13) napišu za svaku od razdvojenih tavanica u skalarnom obliku u odnosu na inercijalni sistem Oxy, dobija se:

Tavanica (A):

$$m_1 v_1'' - m_1 v_1' = -I \cos \theta \quad (14)$$

$$m_1 v_1'' - m_1 v_1' = -I \sin \theta \quad (15)$$

$$J_{\zeta_1} \phi_1'' - J_{\zeta_1} \phi_1' = I h_1 \quad (16)$$

Tavanica (B):

Slab (B):

$$m_2 v_2'' - m_2 v_2' = I \cos \theta \quad (17)$$

$$m_2 v_2'' - m_2 v_2' = I \sin \theta \quad (18)$$

$$J_{\zeta_2} \phi_2'' - J_{\zeta_2} \phi_2' = -I h_2 \quad (19)$$

Sa h_i (i=1, 2) označeno je rastojanje pravca normale u tački Q do odgovarajućeg centra mase koje je dato relacijom (10).

U ovih šest jednačina (14)-(19), osim šest nepoznatih generalisanih brzina neposredno poslije sudara, postoji i sedma nepoznata veličina, a to je unutrašnji udarni impuls I. Da bi se rješio ovaj sistem jednačina, uvodi se koeficijent sudara (ili koeficijent restitucije) k definisan kao:

The process of impact is described by the Law of momentum and the Law of the moment of momentum in the finite forms, written for each separated slab (i=1,2), immediately after and immediately before the impact:

where:

– $\dot{\mathbf{K}}_i = m_i \cdot \dot{\mathbf{v}}_i$ are the vectors of the momentum of the slab i (m_i is the mass, and $\dot{\mathbf{v}}_i$ is the velocity of the center of mass of the slab i),

– $\dot{\mathbf{D}}_i = J_{\zeta_i} \cdot \dot{\phi}_i$ are the vectors of the moment of momentum of the slab i (components that are perpendicular to slabs), while J_{ζ_i} is the central mass moment of inertia

for the axis perpendicular to slab, and $\dot{\phi}_i$ is the angular velocity of rotation of the slab around the vertical axis,

– $\dot{\mathbf{I}}_i$ are the impact impulses between slabs,

– \mathbf{H}_i are the impuls moments with respect to the centers of mass of slabs, i.e. with respect to the central axes perpendicular to slabs ζ_i .

In relations (12) and (13) the single prime (...) denotes a quantity immediately before the impact, while the double prime (...) denote a quantity immediately after the impact.

If the Laws (12) and (13) are written for each of the separated slabs in the scalar form, with respect to the global system Oxy, one obtains:

Slab (A):

Symbols h_i (i=1, 2) denote the distance of the normal n in the point Q to the corresponding center of mass, as given by the expression (10).

Presented six equations (14)-(19), besides the six unknown generalized velocities immediately after the impact, contain also the seventh unknown quantity, which is the internal impact impulse I. In order to solve this system of equations, the coefficient of impact (or the coefficient of restitution) k is introduced as:

$$k = \frac{|v_{n2}'' - v_{n1}''|}{|v_{n1}' - v_{n2}'|} \quad k \in [0,1] \quad (20)$$

gdje su v_{ni}' i v_{ni}'' ($i=1, 2$) komponente brzina tačke sudara Q u pravcu normale jedne i druge tavanice neposredno prije odnosno neposredno poslije sudara, date sa relacijom (9) kao:

$$v_{ni}' = v_i' \cos \theta + v_i' \sin \theta - \phi_i' h_i \quad (i = 1, 2) \quad (21)$$

$$v_{ni}'' = v_i'' \cos \theta + v_i'' \sin \theta - \phi_i'' h_i \quad (i = 1, 2) \quad (22)$$

Koeficijent sudara je realan broj u intervalu $[0, 1]$. Ukoliko je $k=1$, onda je u pitanju idealno elastičan sudar tokom kojeg nema gubitka u ukupnoj kinetičkoj energiji. Slučaj $k=0$ predstavlja idealno plastičan sudar kod koga je ostvaren najveći gubitak u ukupnoj kinetičkoj energiji koji je utrošen na plastično deformisanje materijala obje tavanice.

Ako se u relaciju (20) unesu izrazi (21) i (22), a zatim se nepoznate generalisane brzine tavanica neposredno poslije sudara izraze preko nepoznatog impulsa iz relacija (14)-(19), dobija se sledeća jednačina u kojoj figuriše samo nepoznati udarni impuls:

$$|aI - b| = k|b| \quad (23)$$

gdje su:

$$a = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{m_i} + \frac{h_i^2}{J_{\zeta_i}} \right) \quad (24)$$

$$b = v_{n1}' - v_{n2}' \quad (25)$$

Može da se konstatuje da su koeficijenti a i b dati sa (24) i (25) pozitivni realni brojevi. To je očigledno za koeficijent a koji predstavlja zbir pozitivnih brojeva, a koeficijent b je pozitivan jer predstavlja uslov sudara tavanica po brzinama, dat sa (4).

Nepoznati unutrašnji impuls I , kao rješenje jednačine (23), može se prikazati u obliku:

$$I = (1 + k) \frac{b}{a} \quad (26)$$

Unošenjem izraza (26) u izraze (14)-(19) dobijaju se generalisane brzine za obje tavanice neposredno poslije sudara.

Formalno bi postojalo i rješenje jednačine (23) u obliku :

$$I = (1 - k) \frac{b}{a} \quad (27)$$

Međutim, u ovom slučaju za idealno elastičan sudar ($k=1$) imuls bi bio jednak nuli, pa bi tada generalisane brzine za obje tavanice neposredno poslije sudara ostale iste kao i neposredno prije sudara, što nema fizičkog smisla.

where v_{ni}' and v_{ni}'' ($i=1, 2$) are the velocity components of the point of impact Q of both slabs in direction of the normal, immediately before and immediately after the impact, given by (9) as:

The coefficient of impact is the real number in the interval $[0,1]$. The case of $k=1$ represents the ideally elastic impact where there is no global loss of kinetic energy. The case $k=0$ represents the ideally plastic impact with the largest loss in the total kinetic energy which is spent on the plastic deformation of the material of both slabs.

If the expressions (21) and (22) are introduced into relation (20), and if the unknown generalized velocities immediately after the impact are expressed through the unknown impuls, using equations (14)-(19), one obtains the following equation with the impact impuls as the only unknown:

where the coefficients a and b are given by:

It could be established that the coefficients a and b , given by (24) and (25), are positive real numbers. It is quite obvious for the coefficient a which is the sum of positive numbers, and the coefficient b is positive because it represents the velocity condition of impact, given by (4).

The unknown internal impuls I , as the solution of equation (23), may be presented in the form:

Introducing the expression (26) into (14)-(19) one obtains the generalized velocities for both slabs immediately after the impact.

The formal solution of Eq. (23) may be also presented in the form:

However, in this case for the ideally elastic impact ($k=1$) the impuls would be equal to zero, so in that case the generalized velocities of both slabs immediately after the impact would be the same as immediately before the impact, which does not have the physical sense.

3 ANALIZA MOGUĆEG SUDARA SUSJEDNIH ZGRADA USLED ZEMLJOTRESA

Iako, u toku zemljotresa dolazi do naglog, potpuno nepravilnog oscilovanja površinskih slojeva zemljine kore, njegov uticaj na zgradu, zbog relativno malih dimenzija osnove zgrade u odnosu na talasnu dužinu seizmičkih talasa u tlu, se posmatra kao prinudno kretanje temelja zgrade u horizontalnoj ravni. Metode analize zgrada usled dejstva zemljotresa, zavise od vrste primjenjene analize (statičke ili dinamičke) i usvojenog modela konstrukcije (linearnog ili nelinearnog), prikazane su u radovima [8] i [10]. Primjenom nelinearne dinamičke analize, koja je suviše komplikovana za praktičnu primjenu, dobijaju se najtačniji rezultati. U radu [9], primjenom nelinearne dinamičke analize, je analizirano ponašanje konstrukcije na dejstvo standardnih i impulsnih zemljotresa. Za razliku od standardnih (tipičnih) zemljotresa gdje dolazi do kretanja tla koje je slično oscilacijama, odnosno do oscilacija zgrade, kod impulsnih zemljotresa dolazi do iznenadnog i veoma velikog unosa energije u konstrukciju zbog naglog trzaja podloge.

U ovom radu kao osnova, za analizu mogućeg sudara višespratnih nesimetričnih zgrada u uslovima zemljotresa, poslužio je matematički model uticaja zemljotresa na jednu višespratnu nesimetričnu zgradu (preko zadatog akceleroograma standardnog zemljotresa) prikazan u radu [12].

Sada se posmatraju dvije susjedne višespratne nesimetrične zgrade sa različitim brojem spratova, N_1 odnosno N_2 . Zgrade su istih spratnih visina i izložene su istoj seizmičkoj pobudi koja je definisana sa akceleroogramom $\ddot{\mathbf{u}}_g(t)$ i sa dominantnim pravcem pod uglom β , koji se mjeri u horizontalnoj ravni u odnosu na osu x usvojenog globalnog koordinatnog sistema.

Diferencijalne jednačine kretanja zgrada date su kao:

$$\mathbf{M}_1 \ddot{\boldsymbol{\delta}}_1 + \mathbf{C}_1 \dot{\boldsymbol{\delta}}_1 + \mathbf{K}_1 \boldsymbol{\delta}_1 = -\mathbf{M}_1 \mathbf{b}_1 \ddot{\mathbf{u}}_g(t) = \mathbf{g}_1(t) \quad (28)$$

$$\mathbf{M}_2 \ddot{\boldsymbol{\delta}}_2 + \mathbf{C}_2 \dot{\boldsymbol{\delta}}_2 + \mathbf{K}_2 \boldsymbol{\delta}_2 = -\mathbf{M}_2 \mathbf{b}_2 \ddot{\mathbf{u}}_g(t) = \mathbf{g}_2(t) \quad (29)$$

gdje su \mathbf{M}_i , \mathbf{K}_i i \mathbf{C}_i matrice masa, krutosti i prigušenja, dok \mathbf{d}_i i \mathbf{g}_i predstavljaju vektor generalisanih pomjeranja i vektor opterećenja za pojedine zgrade. Ove jednačine su detaljnije prikazane u radu [12].

Proces analize mogućeg sudara zgrada započinje se simultanim rješavanjem jednačina kretanja za obje zgrade koristeći α postupak direktne numeričke integracije. Znači, u svakom intervalu vremena Δt rješava se prvo za jednu, a zatim za drugu zgradu ekvivalentni "statički" problem:

$$\mathbf{K}_i^* \boldsymbol{\delta}_{i,n+1} = \mathbf{g}_{i,n+\alpha}^* \quad (i=1, 2; n=1, 2, \dots, n_{t-1}) \quad (30)$$

3 ANALYSIS OF THE POSSIBLE IMPACT OF NEIGHBORING SLABS DURING EARTHQUAKE

Even though during earthquakes a sudden and completely nonregular vibrations of the surface layers of the Earth's crust occur, its influence upon buildings, due to relatively small dimensions in building's plan with respect to the characteristic wave length of seismic waves in soil, is considered as the imposed motion of building's foundation in the horizontal plane. The methods of analysis of buildings during earthquakes depend upon the applied approach (static or dynamic) and adopted numerical model of a building (linear or non-linear), are presented in papers [8] and [10]. Applying the non-linear dynamic analysis, which is too complicated for practical everyday's engineering use, one obtains the most accurate results. Applying the non-linear dynamic analysis, paper [9] is considering behaviour of structures under the influence of the standard and impulsive earthquakes. As opposed to the standard (typical) earthquakes, where the soil motion dominantly looks like vibration, so the vibrations of buildings are happening as a consequence, during impulsive earthquakes, due to the sudden jerk or impulse at the supporting soil, the sudden and large input of energy into the structure occurs.

The present analysis of the possible pounding of multistory non-symmetric buildings during earthquakes is based upon the numerical model of dynamic analysis of the multistory non-symmetric building exposed to an earthquake, defined by the given accelerogram of the standard earthquake, as presented in [12].

Now, two neighboring multistory non-symmetric buildings, with different numbers of stories N_1 and N_2 are considered. It is assumed that story heights of both buildings are the same and that both buildings are exposed to the same earthquake excitation, defined by the accelerogram $\ddot{\mathbf{u}}_g(t)$ and the dominant direction defined by the angle β measured in the horizontal plane with respect of the axis x of the global coordinate system.

Differential equations of motion of both buildings are given by:

where \mathbf{M}_i , \mathbf{K}_i and \mathbf{C}_i represent the matrices of mass, stiffness and damping, while \mathbf{d}_i and \mathbf{g}_i represent the vector of generalized displacements and the loading vector for each building. These equations are presented in more details in [12].

The process of analysis of the possible pounding of buildings starts by the simultaneous solution of the equations of motion of both buildings using the α method of direct numerical time integration. It means that within the each time interval Δt the equivalent "static" problem is solved first for one, and then for the other building:

gdje su \mathbf{K}_i^* efektivne matrice krutosti, a $\mathbf{g}_{i,n+\alpha}^*$ efektivno opterećenje zgrada. Rješavanjem jednačina (30) dobijaju se vektori generalisanih pomjeranja obje zgrade na kraju posmatranog intervala vremena. Sa određenim vektorima generalisanih pomjeranja određuju se vektori brzine i ubrzanja za obje zgrade na kraju posmatranog intervala vremena prema relacijama:

$$\mathbf{g}_{n+1}^* = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \delta_{n+1} - \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \delta_n - \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) \mathbf{g}_n^* - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{g}_n^* \quad (31)$$

$$\mathbf{g}_{n+1}^* = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \delta_{n+1} - \frac{1}{\beta \Delta t^2} \delta_n - \frac{1}{\beta \Delta t} \mathbf{g}_n^* - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{g}_n^* \quad (32)$$

Zatim se, od posljednjeg sprata niže zgrade pa sve do prvog sprata, ispituje međusobni položaj tavanica susjednih zgrada koje se nalaze na istom visinskom nivou. To znači da se prema dobijenim vektorima pomjeranja na kraju posmatranog intervala vremena za svaku zgradu određuju prostorne koordinate oblasti u kojima se nalaze tavanice istog nivoa, naravno, izraženo u odnosu na zajednički globalni koordinatni sistem.

Ukoliko, na kraju posmatranog intervala vremena, nijedan par tavanica istog nivoa nije u međusobnom kontaktu nastavlja se sa simultanim rješavanjem jednačina kretanja zgrada za sledeći interval vremena. Pri tome se vektori brzine i ubrzanja obje zgrade na kraju posmatranog intervala vremena tretiraju kao početni vektori brzine i ubrzanja za naredni interval vremena.

Ako se pri provjeri međusobnog položaja tavanica konstatuje da je ostvaren njihov kontakt u jednoj tački, tada treba proveriti proveriti da li su tavanice u sudaru, tj. da li je ispunjen i uslov sudara po brzinama. Nakon ovoga treba još proveriti da li je došlo do sudara između ostalih parova tavanica istih nivoa, jer sudar se može istovremeno ostvariti između više parova tavanica. Tada se svim tavanicama koje su se sudarile, umjesto brzina koje su dobijene prema relaciji (31) nametnu brzine koje su određene prema klasičnoj analizi ekscentričnog sudara dvije krute ploče koje vrše ravno kretanje prema relacijama (14)-(19). Dakle, generalisane brzine tavanica, odnosno brzine centara mase i ugaone brzine tavanica koje su dobijene postupkom numeričke integracije prema relaciji (31) se tretiraju kao brzine neposredno prije sudara, dok se brzine neposredno poslije sudara, koje su određene prema postupku analize sudara prikazanom u dijelu 2, tretiraju kao početne brzine za sledeći interval vremena.

Ukoliko je, tokom provjere međusobnih položaja tavanica istih nivoa, došlo do preklapanja tavanica, to znači da se sudar već bio dogodio unutar posmatranog intervala vremena. U tom slučaju ponovo se posmatra trenutak na početku posmatranog intervala vremena i ponavlja se postupak, ali sada sa upola smanjenim intervalom vremena u odnosu na prethodni, sa ciljem da se iterativno odredi baš onaj trenutak kada je došlo do kontakta tavanica. Kada odredimo taj trenutak u kome se na kraju intervala vremena dogodio sudar, onda imamo prethodni slučaj i analiza sudara se vrši na prethodno objašnjeni način. Posle izvršene analize

where \mathbf{K}_i^* are the effective stiffness matrices and $\mathbf{g}_{i,n+\alpha}^*$ are the effective loading of buildings. By solving the linear algebraic equations (30) one obtains the vectors of the generalized displacements of both buildings at the end of the considered time interval. With obtained vectors of generalized displacements the vectors of generalized velocities and accelerations for both buildings, at the end of considered time interval, are calculated as:

After that, starting with the top floor of the lower building and down to the first floors, the mutual positions of the corresponding slabs at the same level of both buildings is established. It means that using the obtained generalized displacements at the end of the time interval, spatial coordinates of the slab areas for each building are determined, of course, with respect to the same global coordinate system.

If, at the end of considered time interval, not a single pair of neighboring slabs at the same levels is not in a contact, simultaneous solution of differential equations of motion of both buildings is continued for the next time step (or time interval). Of course, obtained vectors of generalized velocities and accelerations at the end of the previous time interval are treated as the initial velocities and accelerations at the beginning of the next time interval.

If, while checking the positions of slabs at the same level, one obtains that a contact at a point is established, then one must check if also the velocity condition of impact is satisfied too, which means that the collision of considered slabs has occurred at the end of considered time interval. Of course, it is also necessary to check if the impact has occurred between any other pair of slabs at the same level, because it is quite possible that impact happens between several pairs of slabs at the same time. In such a case, to all pair of slabs that are in the condition of impact, instead of velocities obtained according to relation (31), velocities that are calculated according to the classical collision of two rigid plates in planar motion, as presented by (14)-(19), are imposed. Therefore, the generalized velocities of slabs, i.e. velocities of the centers of mass and the angular velocities of slabs, obtained by numerical integration according to relation (31), are treated as velocities immediately before the impact, while velocities immediately after the impact, which are calculated according to analysis given in section 2, are considered as the initial velocities at the beginning of the next time interval.

If, during the process of checking the positions of pairs of slabs of the same level, at the end of the time interval, one obtains the situation of interlapping of slab areas, it means that the impact has already occurred sometimes within the considered time interval. In that case, the beginning of previously considered time interval is considered again and the time stepping procedure is done again, but now with the time interval

sudara za posmatrani interval vremena ponovo se vrši simultano rješavanje jednačina (30) sa prvobitnim, a ne sa smanjenim intervalom vremena koji je dobijen u slučaju preklapanja tavanica.

4 NUMERIČKI PRIMJER

U cilju numeričke realizacije prikazane analize mogućeg sudara nesimetričnih višespratnih zgrada razvijen je odgovarajući kompjuterski program Sudar_3D, [11]. Program, osim što daje vremenske odgovore višespratnih nesimetričnih zgrada usled zadatog akcelorograma, može da ima još i praktičnu primjenu pri određivanju potrebnih širina dilatacionih razdjelnica između susjednih zgrada.

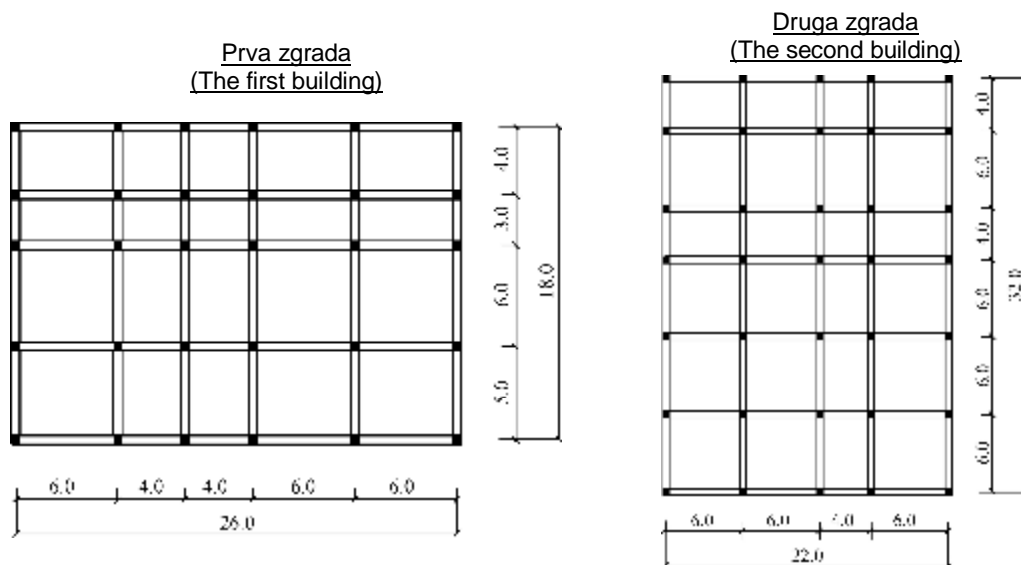
Kao primjer razmatrane su dvije susjedne višespratne nesimetrične zgrade istih spratnih visina, sa sedam odnosno deset spratova. Osnove zgrada, sa neophodnim geometrijskim podacima i podacima o spratnim masama, prikazane su na slici 7, dok su 3D modeli dobijeni primenom komercijalnog programa Tower 6 dati na slici 8. Periodi oscilovanja prvog tona razmatranih susjednih zgrada, dobijeni korišćenjem komercijalnog programa Tower 6, iznose 0.765s, odnosno 1.119s.

reduced by half with respect to the previous time step, in order to capture the moment of impact just at the end of considered time step. If that is achieved, then it is the previously considered situation of the impact at the end of the time interval, so the impact is considered as previously explained. After the collision analysis for considered (reduced) time interval is performed, the usual simultaneous time integration of both buildings, given by (30), is done again, but with the originally selected time interval and not with the reduced one as obtained in the case of overlapping of slabs.

4 NUMERICAL EXAMPLE

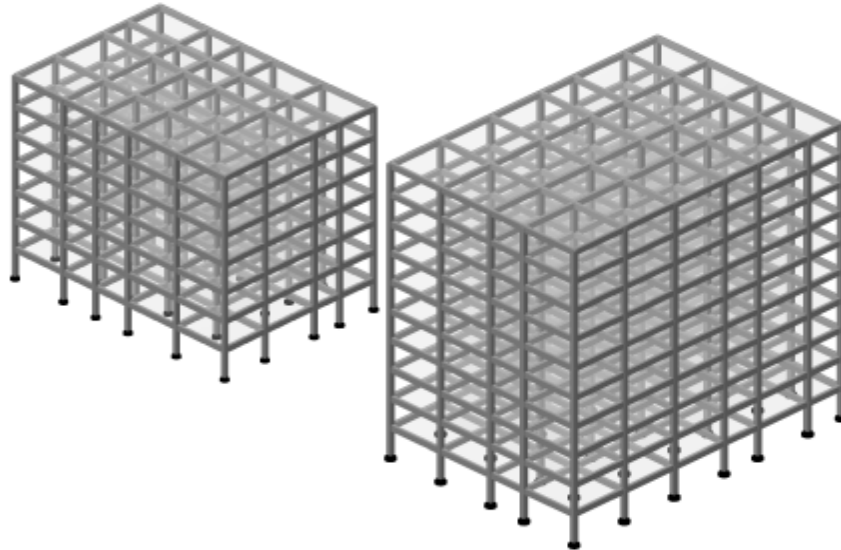
In order to implement presented analysis of the possible pounding of non-symmetric multi-story buildings, the corresponding computer code, called Impact_3D [11], was developed. The code, besides producing the time history response of multi-story non-symmetric buildings due to a given accelerogram, may have also the practical aspect in determination of the necessary separation distance between neighboring buildings.

As an illustrative example, two neighboring multi-story non-symmetric buildings with seven and ten floors



Podaci (Basic data)	Prva zgrada (First building)	Druga zgrada (Second building)
Broj spratova: N (Number of stories)	7	10
Dimenzije stubova: b/h [cm] (Cross section of columns)	45/45	50/50
Dimenzije rigli: b/h [cm] (Cross section of beams)	35/60	35/60
Debljina ploče: d_{pl} [cm] (Slab thickness)	20	22
Modul elastičnosti: E [kN/m ²] (Modulus of elasticity)	$3.15 \cdot 10^7$ (MB 30)	$3.15 \cdot 10^7$ (MB 30)
Spratne mase: (Story masses)	$m_1 = \dots = m_{N-1}$ [kNs ² /m]	555
	m_N [kNs ² /m]	530
		845
		810

Slika 7. Osnove susjednih nesimetričnih zgrada
Figure 7. Plan of the neighboring non-symmetric buildings



Slika 8. Modeli nesimetričnih susjednih zgrada (Tower 6)
Figure 8. 3D Models of non-symmetric neighboring buildings (Tower 6)

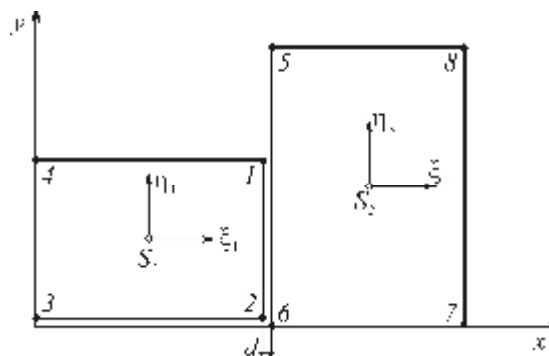
Na slici 9 prikazan je međusobni položaj razmatranih zgrada, sa d je označena dilataciona razdjelnica između njih. Takođe su prikazani usvojeni koordinatni sistemi: referentni Oxy i lokalni $S_1\xi_1\eta_1$ i $S_2\xi_2\eta_2$, postavljeni u centru masa (težištu) tavanica, kao i položaj karakterističnih tačaka kontura razmatranih susjednih zgrada.

Posmatrane zgrade su izložene zemljotresu čiji akcelerogram odgovara frekventnom zapisu zemljotresa El Centro, iz decembra 1940. godine, komponenta NS, sa dominantnim pravcem delovanja u pravcu globalne ose x ($\beta=0^\circ$). Akcelerogram je skaliran tako da maksimalno ubrzanje tla iznosi $0.32g$ ($g=9.81\text{m/s}^2$). Izračunavanje je urađeno dva puta: jednom sa dilatacionom razdjelnicom dovoljnih dimenzija ($d=0.5\text{m}$), tako da zgrade usled zemljotresa osciluju međusobno nezavisno, a drugi put sa dilatacionom razdjelnicom nedovoljnih dimenzija ($d=0.2\text{m}$), tako da dolazi do sudara tavanica tokom vibriranja zgrada. U tom slučaju usvojen je koeficijent sudara u iznosu od $k=0.5$. Odgovor zgrada je posmatran u ukupnom trajanju akcelerograma zemljotresa El Centro (12.2s) sa usvojenim vremenskim korakom $\Delta t=0.05\text{s}$.

and with the same story heights are considered. The plan of both buildings, with the necessary geometric and mass data, are presented in Fig. 7, and isometric views obtained in the commercial computer code Tower 6, are given in Fig. 8. Natural periods of the first mode of free vibrations of considered adjacent buildings, using the commercial code Tower 6, are obtained as 0.765s and 1.119s.

Fig. 9 presents the mutual configuration in plan of considered buildings, with d denoting the separation gap between them. Also, adopted coordinate systems are presented: the global system Oxy and the local ones $S_1\xi_1\eta_1$ and $S_2\xi_2\eta_2$, which are assumed in the center of mass of floor slabs, as well as the characteristic points on the contours of both adjacent buildings.

Considered buildings are exposed to the earthquake whose frequency contents corresponds to the El Centro record, from Dec. 1940, direction N-S, with the dominant direction along the x axis ($\beta=0^\circ$). The accelerogram is scaled to the maximum acceleration equal to $0.32g$ ($g=9.81\text{m/s}^2$). Calculations are performed twice: once with the separation distance of more than sufficient value ($d=0.5\text{m}$), so the buildings are vibrating independently



Slika 9. Položaj karakterističnih tačaka kontura susjednih zgrada
Figure 9. Disposition of the characteristic points of the contours of adjacent buildings

Sudar zgrada, u toku trajanja akcelorograma, se desio 11 puta: osam puta su se sudarile tavanice sedmog, dva puta tavanice šestog i jednom tavanice petog sprata. Kontakt između tavanica sedmog sprata ostvaren je još jednom, ali pri tome nije došlo do sudara jer nije bio ispunjen i uslov sudara po brzinama u tački kontakta dotičnih tavanica. Prvi sudar se desio između tavanica sedmog sprata, što je bilo i očekivati s obzirom da je tavanica sedmog sprata poslednja za prvu (nižu) zgradu, u trenutku $t=3.1257s$.

Na slikama 10-17, za zadati akcelorogram, prikazani su vremenski odgovori razmatranih susjednih zgrada, odnosno njihovih tavanica sedmog sprata (poslednji sprat za prvu-nižu zgradu). Pri tome je sivom linijom prikazan odgovor u slučaju kada je dilataciona razdjelnica dovoljnih dimenzija, pa ne dolazi do sudara ($d=0.5m$), a crnom linijom u slučaju kada je dilataciona razdjelnica nedovoljnih dimenzija, pa dolazi do sudara zgrada ($d=0.2m$).

Vremenska promjena generalisanih pomjeranja u_7 , v_7 , φ_7 i generalisanih brzina \dot{u}_7 , \dot{v}_7 i $\dot{\varphi}_7$ centra mase tavanice sedmog sprata za obje zgrade prikazana je na slikama 10-13.

Pri nezavisnom oscilovanju zgrada, tj. u slučaju dilatacione razdjelnice dovoljnih dimenzija ($d=0.5m$) maksimalna pomjeranja centra mase tavanice sedmog sprata u pravcu x i y ose (u_{7max} i v_{7max}) za prvu zgradu iznose 20.1cm i 2cm (slika 10), a za drugu 16.2cm i 0.9cm (slika 12).

Na slikama 14 i 15 prikazana je vremenska promjena pomjeranja karakterističnih tačaka 1 i 2 tavanice broj 7 prve zgrade u_7^{1*} , v_7^{1*} , u_7^{2*} i v_7^{2*} , a na slikama 16 i 17 vremenska promjena pomjeranja karakterističnih tačaka 5 i 6 tavanice broj 7 druge zgrade u_7^{5*} , v_7^{5*} , u_7^{6*} i v_7^{6*} .

during the earthquake, and the second time with dilatation joint of a smaller value ($d=0.2m$), so the pounding between slabs during earthquake may occur. In this case, the coefficient of impact is assumed with the value of $k=0.5$. The time response of buildings was calculated during the complete duration of El Centro earthquake (12.2s) and the adopted time step was $\Delta t=0.05s$.

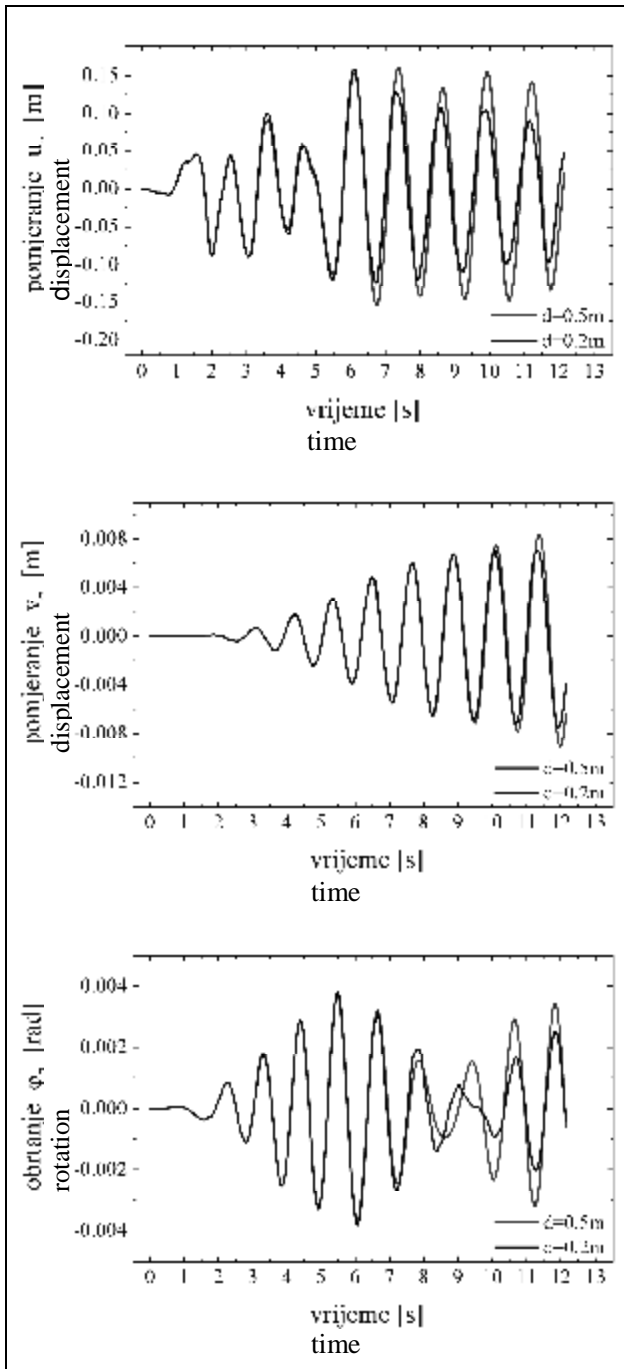
During the earthquake duration pounding has occurred 11 times: eight times between slabs at the seventh floor, two times slabs at the sixth floor and once slabs at the fifth floor. Also, the contact of slabs of the seventh floor has occurred once, but the pounding did not happen, because the velocity condition at the point of contact was not satisfied at the same time. The first pounding occurred, at the time $t=3.1257s$, between slabs at the seventh floor, which was to be expected, since the seventh floor is the top floor for the first (lower) building.

Figs. 10-17 are presenting the time response of both buildings, due to considered earthquake excitation, or rather, the time response of their slabs of the seventh floor (which is the top floor for the lower building). The gray line is used for the time history response for the case when the separation distance is sufficient ($d=0.5m$), so there is no pounding, while the black line represents the second case when the separation distance is insufficient ($d=0.2m$), so the pounding happened.

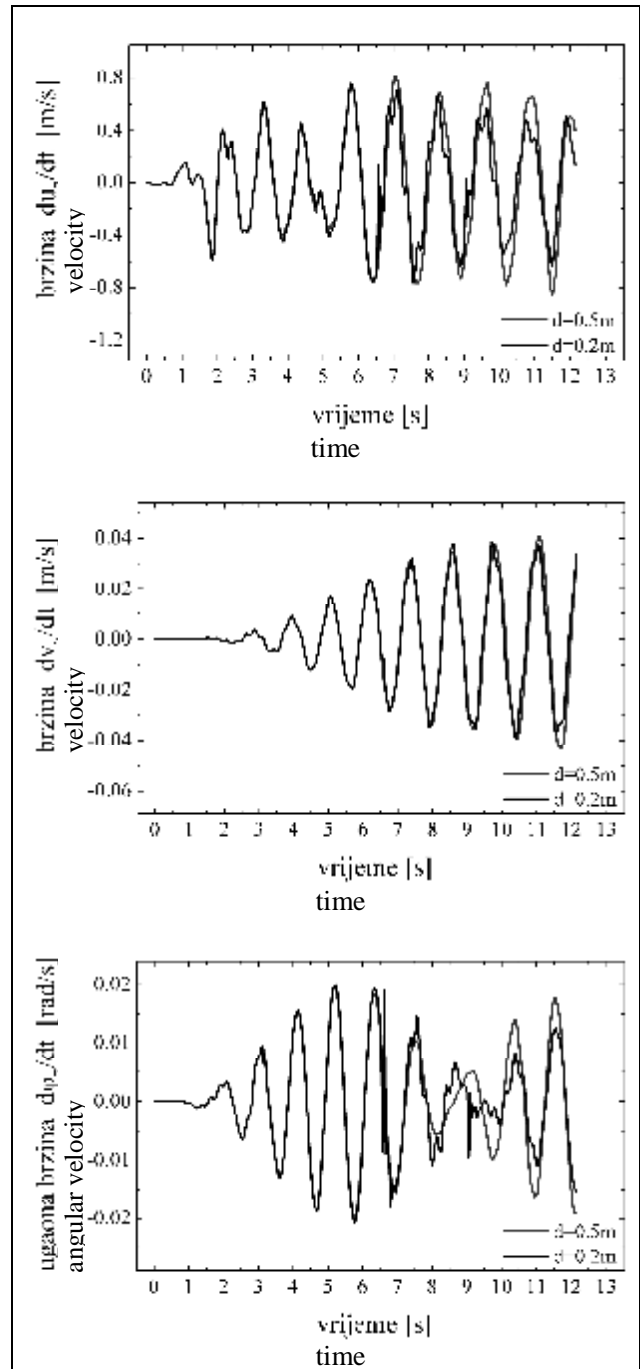
The time history response of the generalized coordinates u_7 , v_7 , φ_7 and the generalized velocities \dot{u}_7 , \dot{v}_7 and $\dot{\varphi}_7$ of the center of mass of the seventh floor for both buildings is presented in Figs. 10-13.

In the case of independent vibrations of buildings, i.e. in the case when the separation joint is sufficient ($d=0.5m$), the maximum displacements of the center of mass of the slab at the seventh floor with respect to axes x and y (i.e. u_{7max} and v_{7max}) for the first building are equal to 20.1cm and 2cm (Fig. 10), and for the second building 16.2cm and 0.9cm (Fig. 12).

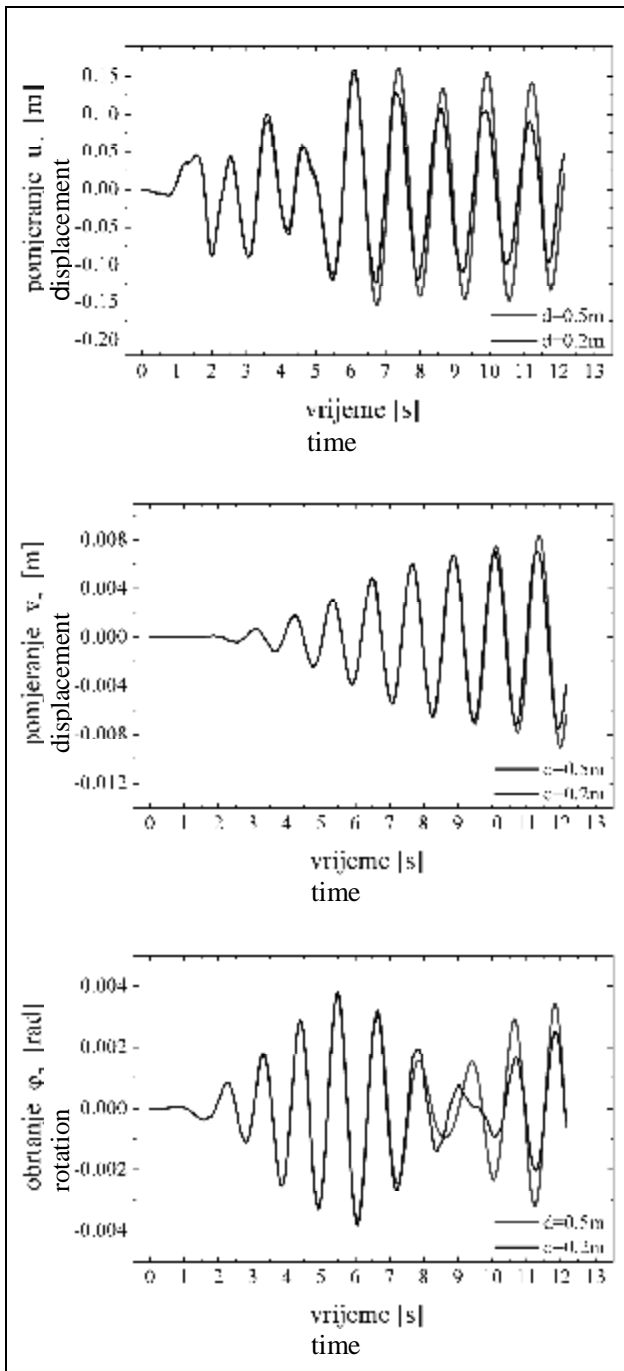
Figs. 14 and 15 are presenting the time history response of displacements of the characteristic points 1 and 2 of the slab 7 of the first building, i.e. u_7^{1*} , v_7^{1*} , u_7^{2*} and v_7^{2*} , while Figs. 16 and 17 present the time history response of characteristic points 5 and 6 of the slab 7 of the second building, i.e. u_7^{5*} , v_7^{5*} , u_7^{6*} and v_7^{6*} .



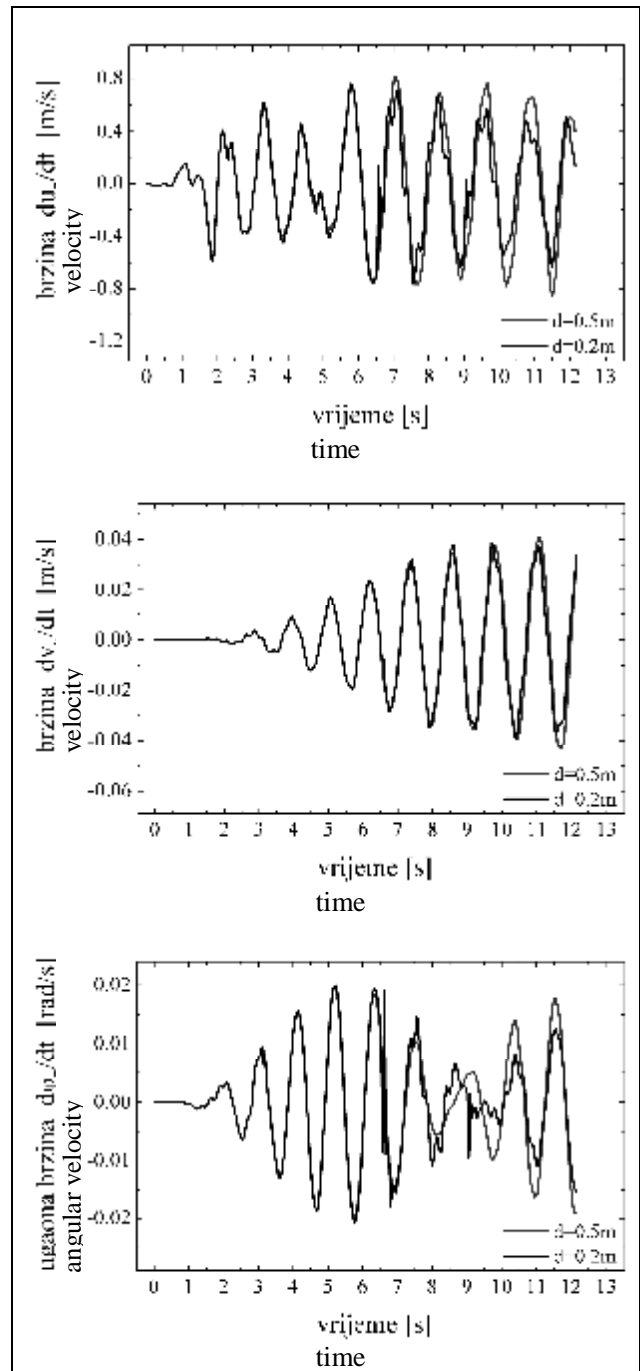
Slika 10. Vremenska promjena generalisanih pomjeranja u_7, v_7 i j_7 prve zgrade
 Figure 10. Time history of generalized displacements u_7, v_7 and j_7 of the first building



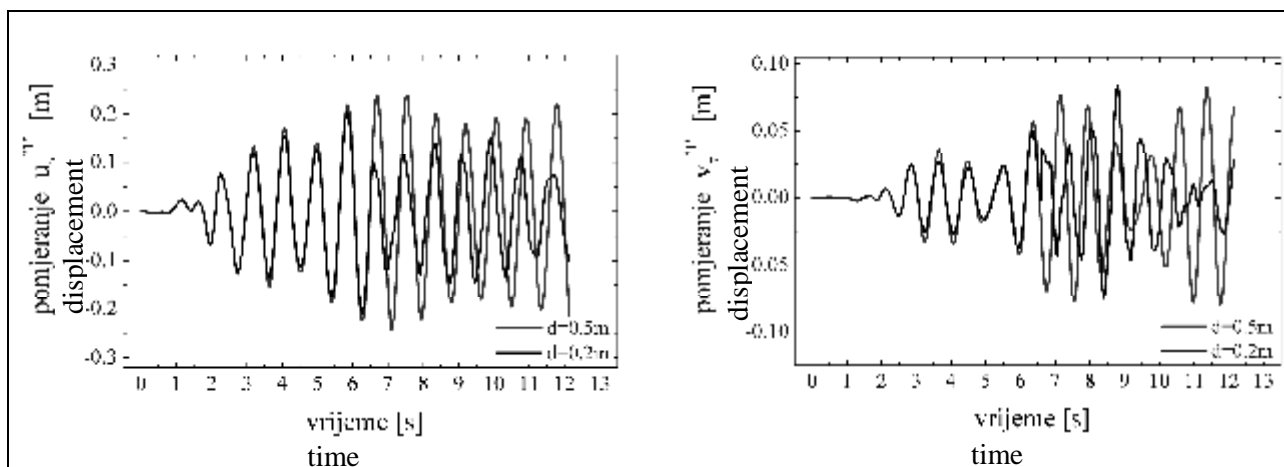
Slika 11. Vremenska promjena generalisanih brzina \dot{u}_7, \dot{v}_7 i $\dot{\phi}_7$ prve zgrade
 Figure 11. Time history of generalized velocities \dot{u}_7, \dot{v}_7 and $\dot{\phi}_7$ of the first building



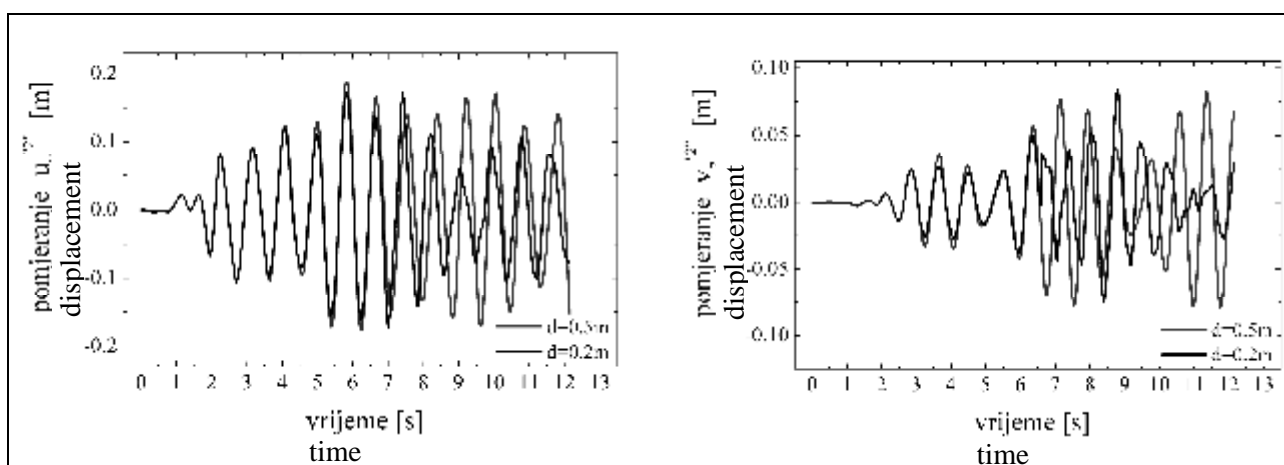
Slika 12. Vremenska promjena generalisanih pomjeranja u_7, v_7 i j_7 druge zgrade
 Figure 12. Time history of generalized displacements u_7, v_7 and j_7 of the second building



Slika 13. Vremenska promjena generalisanih brzina \dot{u}_7, \dot{v}_7 i $\dot{\phi}_7$ druge zgrade
 Figure 13. Time history of generalized velocities \dot{u}_7, \dot{v}_7 and $\dot{\phi}_7$ of the second building



Slika 14. Vremenska promjena pomjeranja $u_7^{1''}$ i $v_7^{1''}$ (prva zgrada)
 Figure 14. The time history response of displacements $u_7^{1''}$ and $v_7^{1''}$ (the first building)



Slika 15. Vremenska promjena pomjeranja $u_7^{2''}$ i $v_7^{2''}$ (prva zgrada)
 Figure 15. The time history response of displacements $u_7^{2''}$ and $v_7^{2''}$ (the first building)

Maksimalna pomjeranja karakterističnih tačaka "1" i "2" tavanice sedmog sprata prve zgrade u pravcu x i y ose ($u_{7\max}^{1''}$ i $v_{7\max}^{1''}$ odnosno $u_{7\max}^{2''}$ i $v_{7\max}^{2''}$) pri nezavisnom vibriranju zgrada iznose 24.2cm i 8.3cm, odnosno 18.8cm i 8.3cm (slike 14 i 15).

Maksimalna pomjeranja karakterističnih tačaka "5" i "6" tavanice sedmog sprata druge zgrade u pravcu x i y ose ($u_{7\max}^{5''}$ i $v_{7\max}^{5''}$ odnosno $u_{7\max}^{6''}$ i $v_{7\max}^{6''}$) pri nezavisnom vibriranju zgrada iznose 21.2cm i 4.6cm, odnosno 13.4cm i 4.6cm (slike 16 i 17).

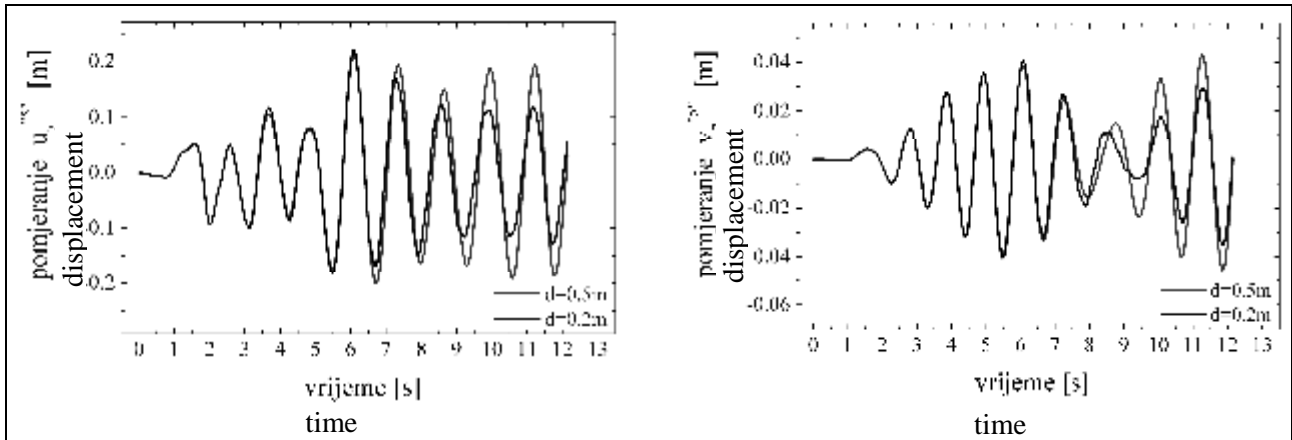
Imajući u vidu da je pri nezavisnom vibriranju zgrada maksimalna vrijednost pomjeranja u pravcu x ose tavanice sedmog sprata za prvu zgradu 20.1cm, a za drugu 16.2cm i da se ta pomjeranja ostvaruju oko sedme sekunde ($t=6.7-7.3s$), tj. u sličnim trenucima vremena, zaključuje se da za ovaj slučaj širina dilatacione razdjelnice treba da iznosi 37cm, da ne bi došlo do sudara razmatranih zgrada. Zbog toga su izvršene odgovarajuće dodatne analize, koje se ovdje ne prikazuju, sa dilatacijama od $d=35cm$ i $d=37cm$.

The maximum displacements of the characteristic points "1" and "2" of the slab of the seventh floor of the first building in directions of axes x and y (i.e. $u_{7\max}^{1''}$ and $v_{7\max}^{1''}$, or $u_{7\max}^{2''}$ and $v_{7\max}^{2''}$) during the independent vibrations of buildings are equal to 24.2cm and 8.3cm, and also 18.8cm and 8.3 cm (Figs. 14 and 15).

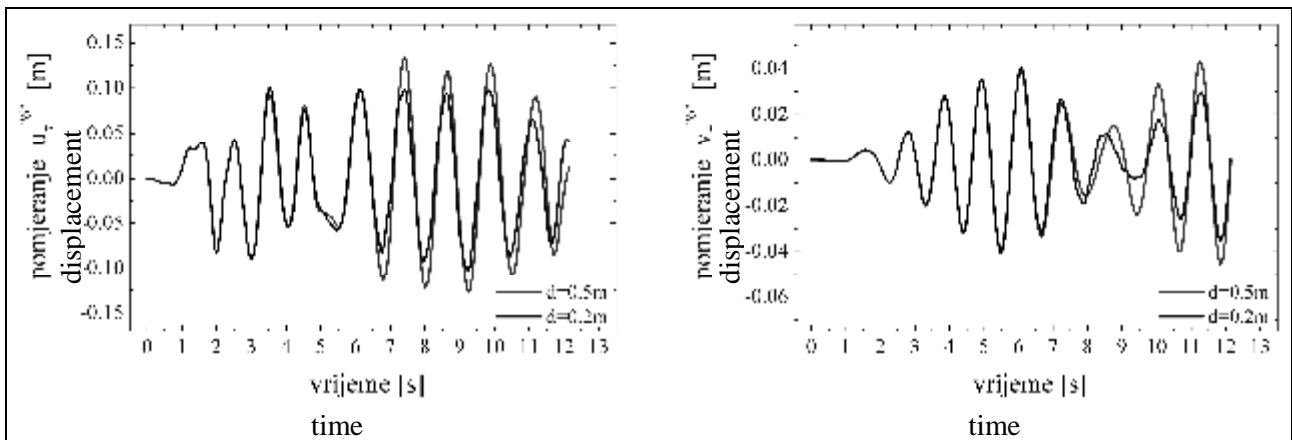
The maximum displacements of the characteristic points "5" and "6" of the slab of the seventh floor of the second building in directions of axes x and y (i.e. $u_{7\max}^{5''}$

and $v_{7\max}^{5''}$, or $u_{7\max}^{6''}$ and $v_{7\max}^{6''}$), during the independent vibrations of buildings are equal to 21.2cm and 4.6cm, and also 13.4cm and 4.6cm (Figs. 16 and 17).

Having in mind that in the independent vibrations of buildings the maximum values of displacements in direction of x axis for the first building is 20.1cm and 16.2cm for the second building and also that the maximum displacements are occurring about the seventh second ($t=6.7$ to $7.3s$), i.e. in the similar time, one may conclude that for this case the separation joint should be



Slika 16. Vremenska promjena pomjeranja $u_7^{5''}$ i $v_7^{5''}$ (druga zgrada)
 Figure 16. The time history response of displacements $u_7^{5''}$ and $v_7^{5''}$ (the second building)



Slika 17. Vremenska promjena pomjeranja $u_7^{6''}$ i $v_7^{6''}$ (druga zgrada)
 Figure 17. The time history response of displacements $u_7^{6''}$ and $v_7^{6''}$ (the second building)

U slučaju kada je dilataciona razdjelnica između razmatranih zgrada iznosila 35cm sudar zgrada, odnosno tavanica sedmog sprata, dogodio se dva puta i to u trenucima vremena $t=6.62s$ i $t=6.72s$, dok za $d=37cm$ nije bilo sudara zgrada.

5 ZAVRŠNE NAPOMENE

Na osnovu prikazanog numeričkog modela mogućeg sudara susjednih nesimetričnih višespratnih zgrada istih spratnih visina usled uticaja zemljotresa prikazanog preko zadatog akcelorograma, razvijen je kompjuterski program Sudar_3D. Program, koji osim što daje vremenske odgovore višespratnih nesimetričnih zgrada usled zadatog akcelorograma, uključujući i analizu mogućeg sudara zgrada, može da ima još i praktičnu primjenu pri određivanju potrebnih širina dilatacionih razdjelnica između susjednih zgrada.

equal et least 37cm, in order to prevent pounding. Therefore, the corresponding analyses were also conducted for dillatation joints of $d=35cm$ and $d=37cm$, but they are not presented here.

In the case when the separation joint was 35cm the pounding of buildings, i.e. slabs of the seventh floor, has occurred two times, namely at times $t=6.62s$ and $t=6.72s$, while for the case of $d=37cm$ there were no pounding.

5 THE FINAL REMARKS

In accordance with the presented analysis of the possible pounding between buildings with the same story heights during an earthquake, described by the given accelerogram, the corresponding computer program Impact_3D was developed. The code, besides producing the time history response of multi-story non-symmetric buildings due to a given accelerogram, may have also the practical aspect in determination of the necessary separation gaps between neighboring buildings.

U cilju ilustracije numeričkog postupka razmatrane su dvije susjedne višespratne nesimetrične zgrade istih spratnih visina, sa sedam odnosno deset spratova (slike 7 i 8). Prikazani su vremenski odgovori razmatranih zgrada usled djelovanja iste seizmičke pobude (za zadati akcelerogram koji odgovara frekventnom zapisu zemljotresa El Centro, iz decembra 1940. godine, komponenta NS) za dominantni pravac zemljotresa $\beta=0^\circ$. Pri tome su posebno posmatrane dvije situacije, prva kada je dilataciona razdjelnica dovoljnih dimenzija, pa zgrade osciluju nezavisno i druga kada je dilataciona razdjelnica nedovoljnih dimenzija, pa dolazi do sudara zgrada, odnosno njihovih tavanica na istom visinskom nivou (slike 10-17). Zatim je određena potrebna minimalna širina dilatacione razdjelnice pri kojoj ne bi došlo do sudara razmatranih zgrada usled zadatog zemljotresa.

Analizom navedenih primjera može da se zaključi da vremenski odgovori susjednih nesimetričnih zgrada, kao i potrebna širina dilatacione razdjelnice, zavise kako od međusobnog položaja zgrada, njihovih krutosti, rasporeda masa, tako i prirode zemljotresa. To znači, od datog akcelerograma (frekventnog sastava i maksimalnog ubrzanja) i njegovog dominantnog pravca djelovanja, kao i od usvojene vrijednosti koeficijenta sudara, tj. lokalne disipacije energije u zoni sudara.

In order to illustrate the numerical procedure two neighboring multi-story non-symmetric building of the same story heights, with seven and ten floors are considered (Figs. 7 and 8). The time history responses of considered buildings, due to the same earthquake excitation (given accelerogram of El Centro earthquake, from Dec. 1940, component N-S) for the dominant direction in the x axis, $\beta=0^\circ$. Two cases were considered, the first one when the separation joint is sufficient, so the building are vibrating independently, and the second one when the separation joint is insufficient, so the pounding between buildings (i.e. between slabs at the same level) during earthquake is occurring (Figs. 10-17). Also, the minimum possible separation distance is determined in order to prevent pounding in the case of considered buildings due to the given earthquake.

After the analysis of conducted numerical examples one may conclude that the time response of adjacent non-symmetric buildings and the necessary separation distance between buildings depend on the configuration of buildings, their dynamic properties (stiffness and mass distributions) and also on the nature of considered earthquake. It means on the given accelerogram (its frequency content and the maximum acceleration) and the dominant direction of the soil movement, and also on the value of the coefficient of impact, i.e. on the local dissipation of energy in the zone of impact.

6 LITERATURA REFERENCES

- [1] Abdel Raheem S. E.: "Seismic Pounding of Adjacent Building Structures", *Electronic Journal of Structural Engineering*, 6, 2006, pp 66-74
- [2] Anagnostopoulos S. A.: "Earthquake induced pounding: State of the art", Proc. 10th european conf. earthquake eng., Duma, Rotterdam: Balkema, 1995, pp 897-905
- [3] Anagnostopoulos S. A.: "Pounding of buildings in series during earthquakes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 1988, pp 443-456
- [4] Anagnostopoulos S. A., Spiliopoulos K. V.: "An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21, 1992, pp 289-302
- [5] Bertero V.V., Collins R. G.: "Investigation of the failures of the Olive View stairtowers during the San Fernando earthquake and their implications on seismic design, Report No EERC 73-26, University of California, Berkely, 1973
- [6] Brčić S.: "Analiza mogućeg sudara zgrada u seizmičkim uslovima", Simpozijum "Mehanika, materijali i konstrukcije", SANU 1995, knjiga 2, 1996, pp. 159-167
- [7] Brčić S.: "3D Pounding of two single-storey buildings due to an earthquake", Proc. 2nd national congress on Computational Mechanics, Chania, 1996, pp 59-66
- [8] Lađinović Đ.: "Savremene metode seizmičke analize konstrukcija zgrada", *Materijali i konstrukcije* 51(2), 2008, str.25-39.
- [9] Lađinović Đ.: "Nelinearna dinamička analize konstrukcija izloženih dejstvu impulsnih zemljotresa", *Materijali i konstrukcije* 45(3-4), 2002, str.73-77.
- [10] Lađinović Đ., Folić R.: "Analiza konstrukcija zgrada na zemljotresna dejstva", *Materijali i konstrukcije* 47(3-4), 2004, str. 31-64.
- [11] Žugić-Zornija Lj.: *Analiza mogućeg sudara nesimetričnih zgrada usled zemljotresa*, magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 1996
- [12] Žugić Lj., Brčić S.: "Vremenski odgovor nesimetrične zgrade u zavisnosti od dominantnog pravca djelovanja zemljotresa", *Materijali i konstrukcije* 53(1), 2010, str. 14-32.
- [13] Impressions of the Guerrero-Michoacan Mexico earthquake of 19 September 1985, *Preliminary Reconnaissance Report*, EERI, 1985
- [14] Papadrakakis M., Mouzakis H., Plevris N., Bitzarakis S.: "A Lagrange multiplier solution method for pounding of buildings during earthquakes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 20, 1991, pp 981-998
- [15] Wolf J. P., Skrikerud P. E.: "Mutual pounding of adjacent structures during earthquakes", *Nuclear Engineering and Design*, 57, 1980, pp 253-275

Napomena:

Drugi autor (S.Brčić) je zahvalan na finansijskoj podršci od strane Ministarstva nauke Republike Srbije u okviru projekta TR 16017 "Razvoj i unapređenje projektovanja građevinskih konstrukcija izloženih seizmičkim i incidentnim dejstvima".

REZIME

SUDAR SUSJEDNIH NESIMETRIČNIH VIŠESPRATNIH ZGRADA USLED UTICAJA ZEMLJOTRESA

*Ljiljana ŽUGIĆ
Stanko BRČIĆ*

Usled dejstva zemljotresa susjedne zgrade izgrađene u skladu sa postojećim tehničkim propisima načelno osciluju nezavisno. Međutim, ako se njihove relevantne dinamičke karakteristike bitno razlikuju i ako je dilataciona razdjelnica između njih nedovoljnih dimenzija može da dođe do njihovog sudara, tj. sudara tavanica susjednih zgrada na istom visinskom nivou ako su susjedne zgrade istih spratnih visina.

U radu je analiziran mogući sudar susjednih višespratnih zgrada istih spratnih visina usled djelovanja iste seizmičke pobude sa zadatim dominantnim pravcem djelovanja. Zgrade su nesimetrične s obzirom na njihovu krutost i/ili masu, pa je njihov matematički model trodimenzionalan, tj. svaka tavanica vrši ravno kretanje u svojoj horizontalnoj ravni, sa po tri stepena slobode kretanja.

Mogući sudar zgrada je analiziran kombinacijom direktne numeričke integracije odgovarajućih diferencijalnih jednačina kretanja i klasične analize sudara dva kruta tijela pri ravnom kretanju. U slučaju sudara pojedinih tavanica susjednih zgrada nagla promjena u kinematičkom stanju neposredno prije i neposredno poslije sudara određena je rješavanjem odgovarajućih jednačina sudara tavanica. Pri formiranju jednačina sudara tavanica korišćene su uobičajne pretpostavke teorije sudara u klasičnoj mehanici, pri čemu je lokalna disipacija energije u zoni sudara uzeta u obzir uvođenjem koeficijenta sudara.

U cilju numeričke realizacije ovog problema razvijen je odgovarajući kompjuterski program, koji osim što daje vremenske odgovore susjednih višespratnih nesimetričnih zgrada usled zadatog akcelrograma za dominantni pravac zemljotresa, uključujući i analizu mogućeg sudara zgrada, može imati još i praktičnu primjenu pri određivanju potrebnih širina dilatacionih razdjelnica između susjednih zgrada sa ciljem sprečavanja mogućeg sudara za dati zemljotres.

Ključne riječi: sudar zgrada, nesimetrična zgrada, koeficijent sudara, vremenska analiza, uticaj zemljotresa

Note:

The second author (S. Brčić) is grateful for the financial support by the Ministry of Science of the Republic of Serbia in the scope of the project TR 16017 "Development and improvement of design of building structures exposed to seismic and incident actions".

SUMMARY

POUNDING OF ADJACENT NON-SYMMETRIC MULTISTORY BUILDINGS DUE TO AN EARTHQUAKE

*Ljiljana ŽUGIĆ
Stanko BRČIĆ*

Adjacent buildings, if constructed in accordance with the building codes, in event of an earthquake will oscillate independently. However, if their relevant dynamic characteristics are substantially different and if the separation gap between them is insufficient, the pounding between adjacent floor slabs at the same level may happen.

The paper is analyzing a possible pounding of adjacent multistory buildings with the same story heights due to the same earthquake excitation with a given dominant direction. Buildings are non-symmetric with respect to their stiffness and/or mass distributions, so the mathematical model is three-dimensional, i.e. each floor slab is undergoing the planar motion in its plane with three dofs each.

Possible pounding between buildings is analyzed by combination of a direct numerical integration of the corresponding differential equations of motion and the classical analysis of an impact of two rigid bodies in planar motion. In the case of pounding between adjacent slabs the sudden change in kinematic state immediately before and after the collision is determined by solution of the corresponding collision equations. Formulation of the impact equations is based upon the usual assumptions of the impact theory in classical mechanics, with introduction of the coefficient of impact to account the local dissipation of energy in the zone of collision.

The corresponding computer code is developed in order to perform numerical simulations. Besides determination of the time history of adjacent multistory non-symmetric buildings due to earthquake acceleration with a given dominant direction, including the analysis of the possible pounding, the code may also have the practical application to determine the necessary dilatation gap between buildings in order to prevent the pounding for a given earthquake.

Key words: pounding between buildings, non-symmetric buildings, coefficient of impact, time history analysis, earthquake effect

FUNDAMENTALNE KARAKTERISTIKE ASFALTNIH MEŠAVINA U POGLEDU OTPORNOSTI NA TRAJNU DEFORMACIJU

FUNDAMENTAL ASPHALT MIXTURES CHARACTERISTICS REGARDING PERMANENT DEFORMATION RESISTANCE

Miomir MILJKOVIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 625.85:620.1 = 861

1 UVOD

Postupak projektovanja asfaltnih mešavina, Superpave[®] koji se zasniva na analizi zapreminske strukture mešavina, je razvijen u okviru Strateškog programa istraživanja puteva (Strategic Highway Research Program, SHRP) sredinom devedesetih godina prošlog veka. Za razliku od metode projektovanja mešavina po Maršalu, Superpave zapreminskim postupkom projektovanja nije obuhvaćeno ispitivanje mehaničkih karakteristika, radi provere ponašanja mešavine nakon završetka zapreminskog postupka projektovanja. Iskustvo iz postupka implementacije tokom proteklih godina je pokazalo da zapreminski postupak projektovanja, bez ispitivanja mehaničkih karakteristika, nije adekvatan za osiguranje prihvatljivog ponašanja mešavine. Istraživanja koja su vodila ka razvoju „jednostavnog opita ponašanja“ (simple performance test, SPT) su obavljena u okviru NCHRP projekta 9-19: „Superpave podrška i upravljanje modelima ponašanja“ na Univerzitetu države Arizona [1], [2].

Postupak razvoja SPT opita je bio usredsređen na merenje fundamentalnih inženjerskih karakteristika materijala koje povratno mogu biti povezane sa karakteristikama materijala potrebnim za detaljnu analizu procesa nastanka oštećenja. Tri glavna vida oštećenja asfaltnih mešavina koja su uzeta u obzir su trajne deformacije, pukotine usled zamora i termičke pukotine. Glavni cilj celokupnih istraživanja je bio da se od nekoliko mogućih opita, da preporuka o fundamentalnim

1 INTRODUCTION

Superpave[®] asphalt mixture design procedure, which is based on mixture volumetric structure analysis, was developed in Strategic Highway Research Program (SHRP) in the 90s of the last century. Unlike the Marshall mixture design method, testing of mechanical characteristics for controlling of mixture performance after completing the volumetric design procedure is not covered by Superpave volumetric mixture design procedure. Experience from the implementation process during past years showed that volumetric design procedure without testing of mechanical characteristics is not adequate for acceptable mixture performance assurance. Researches that led to the development of simple performance test (SPT) were carried out in NCHRP Project 9-19: “Superpave Support and Performance Models Management” at Arizona State University [1], [2].

SPT test development process was focused on measuring fundamental engineering material characteristics that could be correlated to material characteristics needed for detailed deterioration occurrence process analysis. Three major deterioration types of asphalt mixtures which were considered are permanent deformation, fatigue cracking and thermal cracking. The main goal of overall researches was to, based on several possible tests, give a recommendation about fundamental tests which were the most suitable for

Miomir Miljković, dipl. inž. građ., asistent
Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet,
Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš
e-mail: miomir.miljkovic@hotmail.com;
miomir.miljkovic@gmail.com

Miomir Miljkovic, MScCE, Research Assistant
The University of Nis, The Faculty of Civil Engineering and
Architecture, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Nis
e-mail: miomir.miljkovic@hotmail.com;
miomir.miljkovic@gmail.com

opitima koji su najpogodniji za primenu uz Superpave zapreminski postupak projektovanja mešavina. Razmatrani SPT opiti se mogu svrstati u opite vezane za krutost, opite deformabilnosti, i opite vezane za nastanak pukotina [1], [2].

Jednostavni opit ponašanja (SPT) se definiše kao: „Metoda (metode) ispitivanja koja tačno i pouzdano meri karakteristiku ili parametar odgovora mešavine koja je u dobroj korelaciji sa pojavom oštećenja kolovoza (npr. sa pukotinama i trajnim deformacijama)“ [1], [3].

Kako je ovom definicijom dato, za SPT nije neophodno da predvidi celokupan tok pojave oštećenja ili da prati ponašanja asfaltne mešavine kroz vreme, ali rezultati ispitivanja moraju da omoguće određivanje sposobnosti mešavine da se odupre lomu ili trajnoj deformaciji u definisanim uslovima tokom eksploatacije.

Pri formiranju užeg izbora ovih opita, radi pribavljanja praktičnih informacija direktno od potencijalnih korisnika, korišćen je, između ostalog, i posebno pripremljeni upitnik. Namena prvog dela tog upitnika je bila da se proceni značaj sposobnosti SPT-a da meri odgovore u korelaciji sa pojedinim oštećenjima kolovozne konstrukcije. Uzeta su u obzir sledeća tri tipa oštećenja, a vrednosti u zagradama predstavljaju prosečnu ocenu njihovog relativnog značaja:

1. kolotrazi (1,1)
2. pukotine usled zamora (1,8)
3. termičke pukotine (2,2)

Vrednost „1“ ukazuje da oštećenje mora da bude uzeto u obzir od strane ovog opita, „2“, da je uzimanje u obzir srednjeg značaja, a „3“, da je uzimanje u obzir oštećenja relativno nevažno. Ovim se uočava da su kolotrazi rangirani kao najvažnije oštećenje koje je SPT trebalo da uzme u obzir, zatim slede pukotine usled zamora, a termičke pukotine su na kraju. Drugim delom upitnika je obuhvaćen stav privrednih subjekata u pogledu vrednosti početnih investicija u opremu (rezultat je 36 800 dolara) i vremena potrebnog za ispitivanje (rezultat je 8,6 h) [3].

Nakon obimnog programa laboratorijskih ispitivanja izvršeno je vrednovanje brojnih opita u cilju određivanja mogućnosti da se pomoću njih razlikuju mešavine sa prihvatljivim i neprihvatljivim ponašanjem i predvidi pojava kolotruga [1] Zbog svog najvećeg potencijala u pogledu korelacije laboratorijskih rezultata sa ponašanjem na terenu, kao konačni SPT kandidati za dalje vrednovanje, odabrana su sledeća tri opita:

1. dinamički (kompleksni) modul (E^*)
2. opit trajne deformacije sa ponavljanjem opterećenjem — flow number, (F_n)
3. opit trajne deformacije sa statičkim tečenjem — flow time (F_t) [1], [2], [3], [4], [5].

Takođe, kao potencijalni kandidati za SPT u pogledu loma (pukotina usled zamora) preporučena su sledeća dva opita:

1. dinamički (kompleksni) modul (E^*)
2. indirektna čvrstoća na zatezanje (koja ovim radom nije obuhvaćena)

Kako se vidi, dinamički modul (E^*) je prepoznat kao opit sa značajnim potencijalom da bude SPT za dva važna oštećenja asfaltnih mešavina - kolotrage i lom [1]

Paralelno sa NCHRP projektom 9-19 tekao je i razvoj Uputstva za mehaničko-empirijsko projektovanje kolovoznih konstrukcija (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG) (NCHRP projekti 1-37A i 1-40)

application with Superpave volumetric mixture design procedure. Considered SPT tests could be classified into stiffness related tests, deformability tests, and tests related to cracking occurrence [1], [2].

Simple performance tests (SPT) is defined as: „Testing method (methods) that correctly and reliably measures mixture response characteristic or parameter which is in good correlation to pavement distress occurrence (e.g. cracking or permanent deformation)“ [1], [3].

As given by this definition, for SPT is not to be able to predict overall flow of deterioration occurrence or to follow the performance of asphalt mixture during the time, but the results of the testing have to enable determination of mixtures ability to resist failure or permanent deformation in defined conditions during performance.

During the making of narrow selection of tests, in order to obtain practical information directly from potential users, among others, specially prepared questionnaire was used. The purpose of the first part of questionnaire was to estimate the significance of SPTs ability to measure responses in correlation to the distresses of pavement. The following three types of distresses were considered, and the values in brackets represent their average grade of relative significance:

1. rutting (1,1)
2. fatigue cracking (1,8)
3. thermal cracking (2,2)

Value „1“ indicates that the distress has to be considered by this test, „2“, that considering is of a medium significance and „3“, that consideration of the distress is relatively insignificant. Here, it could be seen that rutting is ranked as the most important distress that SPT should consider, followed by fatigue cracking, with thermal cracking at the end. The second part of the questionnaire covered the attitude of the industry in terms of amount of the equipment initial investment cost (the results was 36 800 dollars), and time needed for carrying out the testing (the result was 8,6 hours) [3].

After the extensive laboratory testing program, an evaluation of numerous tests was performed to determine their ability to differentiate mixtures with acceptable and unacceptable performance and to predict rutting [1] Because of the greatest potential in correlation of laboratory results to field performance, the following three tests were selected as final SPT candidates for further evaluation:

1. dynamic (complex) modulus (E^*)
2. repeated load permanent deformation test - flow number, (F_n)
3. static load permanent deformation test - flow time (F_t) [1], [2], [3], [4], [5].

Also, as a possible candidate for SPT for failure (fatigue cracking) the following two tests are recommended:

1. dynamic (complex) modulus (E^*)
2. indirect tensile strength (which is not covered in this paper)

As it could be seen, dynamic modulus (E^*) is recognised as a test with significant potential to be SPT for two important distresses of asphalt mixtures - rutting and failure [1]

Simultaneous with NCHRP Project 9-19 the development of the Guide for mechanistic-empirical

[6], [7]. U razvoj MEPDG bilo je uključeno vrednovanje i modeliranje glavnih oštećenja fleksibilnih kolovoznih konstrukcija / trajnih deformacija (kolotruga), i pukotina usled zamora (mrežastih i podužnih pukotina). Razvijeni su analitički modeli za predviđanje ponašanja kolovoznih konstrukcija koji su kalibrisani korišćenjem baze podataka sa opitnih deonica Programa dugoročnog ponašanja kolovoza (Long-Term Pavement Performance, LTPP).

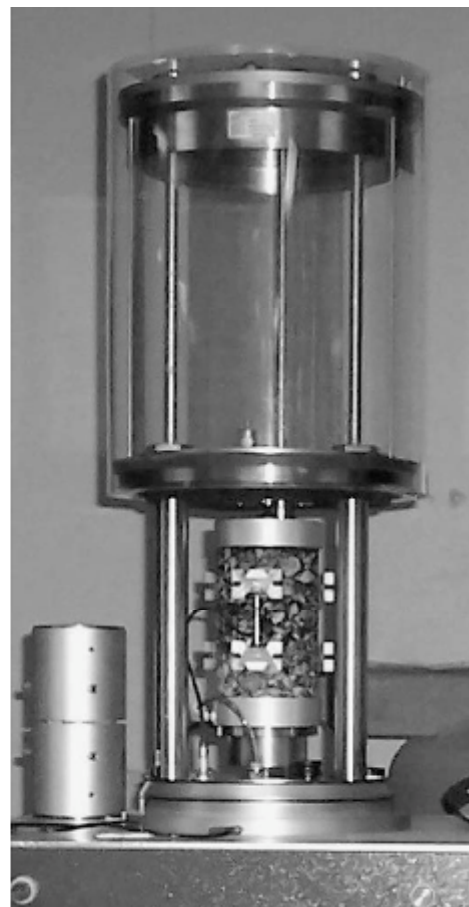
Od tri moguća SPT opita, dinamički modul (E^*) je jedina karakteristika materijala koja je trenutno implementirana u modelima uključenim u MEPDG. Dinamički modul je, takođe, i glavni ulazni podatak o materijalu za spravljanje asfaltnih mešavina. Primena ovog opita, kako za vrednovanje mešavine, tako i za strukturno projektovanje, daje potencijalnu vezu između projektovanja mešavine i strukturne analize, što je bio cilj u osnovi znatnog broja istraživanja fleksibilnih kolovoznih konstrukcija u prošlosti [1], [5], [8].

Slika 1 prikazuje izgled SPT opreme za ispitivanje i otvorenu ćeliju sa probnim telom.

pavement Design Guide (MEPDG) (NCHRP Projects 1-37A and 1-40) was running [6], [7]. The development of MEPDG included evaluation and modelling of major distresses of flexible pavements - permanent deformation (rutting), and fatigue cracking (alligator and longitudinal cracking). Analytical models for pavement performance prediction, which were calibrated by using the database from pit sections of Long-Term Pavement Performance (LTPP) program, were developed.

Of three possible SPT tests, dynamic modulus (E^*) is the only material characteristic that is implemented in models included in MEPDG at the moment. Dynamic modulus is, also, the main asphalt mixture preparation material input. Application of these tests provides a potential link between mixture design and structural analysis, that was an underlying goal of considerable number of past flexible pavement researches [1], [5], [8].

Figure 1 shows view of SPT testing equipment and open chamber with specimen.



Slika 1 — Postavka SPT opreme za ispitivanje [5]
Figure 1 -SPT test equipment setup [5]

U daljem tekstu detaljnije su opisani opiti za određivanja dinamičkog modula, i opiti trajne deformacije sa ponavljanim (flow number) i statičkim opterećenjem (flow time).

Below, the test for determination of dynamic modulus, and repeated load (flow number), and static load permanent deformation test (flow time), are described in more detail.

2 DINAMIČKI MODUL (E^*)

Za linearno viskoelastične materijale kao što su asfaltne mešavine, kompleksni broj koji daje vezu napona i dilatacije pod kontinualno nanošenim sinusoidnim opterećenjem u određenom rasponu frekvencija, predstavlja kompleksni dinamički modul (E^*). Kompleksni modul je definisan kao odnos sinusoidnog napona (u bilo kom trenutku vremena, t , i pri bilo kojoj ugaonoj frekvenciji opterećenja, ω), $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$, i sinusoidne dilatacije, $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$, u istom trenutku vremena i pri istoj frekvenciji, koji daje ustaljeni odgovor (slika 1):

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)}} = \frac{\sigma_0 \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)} \quad (1)$$

gde je

σ_0 - amplituda (maksimalni) napon
 ε_0 - amplituda (maksimalna) dilatacija
 φ - fazni ugao, [°]
 ω - ugaona brzina
 t - vreme, [s]

Matematički, dinamički modul je definisan kao apsolutna vrednost kompleksnog modula, ili:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

dok je fazni ugao definisan kao:

$$\varphi = \frac{t_i}{t_p} 360 \quad (3)$$

gde je:

t_i - vremenska razlika između javljanja amplitude napona i amplitude dilatacije, [s]
 t_p - vremenska razlika između dva ciklusa napona, tj. dilatacije (period), [s]
 i - imaginarni broj.

Izraženo preko realnog i imaginarnog dela:

$$E^* = E' + i E'' = |E^*| \cos \varphi + i |E^*| \sin \varphi \quad (4)$$

E' se kao komponenta kompleksnog modula obično naziva modulom elastičnosti ili skladištenja (storage modulus), dok se E'' naziva modulom gubitka (loss modulus), ili modul viskoziteta. Fazni ugao, φ je ugao za koji ε_0 kasni za σ_0 . On je indikator viskoznih karakteristika datog materijala.

Za čisto elastičan materijal, $\varphi = 0^\circ$, može se uočiti da je kompleksni modul (E^*) jednak apsolutnoj vrednosti, tj. dinamičkom modulu. Za čisto viskozni materijal, $\varphi = 90^\circ$. Ispitivanje dinamičkog modula asfaltnih mešavina se normalno sprovodi korišćenjem šeme jednoosno nanetog sinusoidnog napona kao što je to prikazano na slici 2.

2 DYNAMIC MODULUS (E^*)

For linear viscoelastic materials such as asphalt mixtures, a complex number that gives stress-to-strain relationship under continuously applied sinusoidal loading in the frequency domain, represents complex dynamic modulus (E^*). Complex modulus is defined as relationship of sinusoidal stress (at any given time, t , and angular load frequency, ω), $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$, and sinusoidal dilatation, $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$, at the same time and frequency, that results in a steady-state response (Figure 1):

where:

σ_0 - peak (maximum) stress
 ε_0 - peak (maximum) strain
 φ - phase angle, [°]
 ω - angular velocity
 t - time, [s]

Mathematically, the dynamic modulus is defined as an absolute value of complex modulus, or:

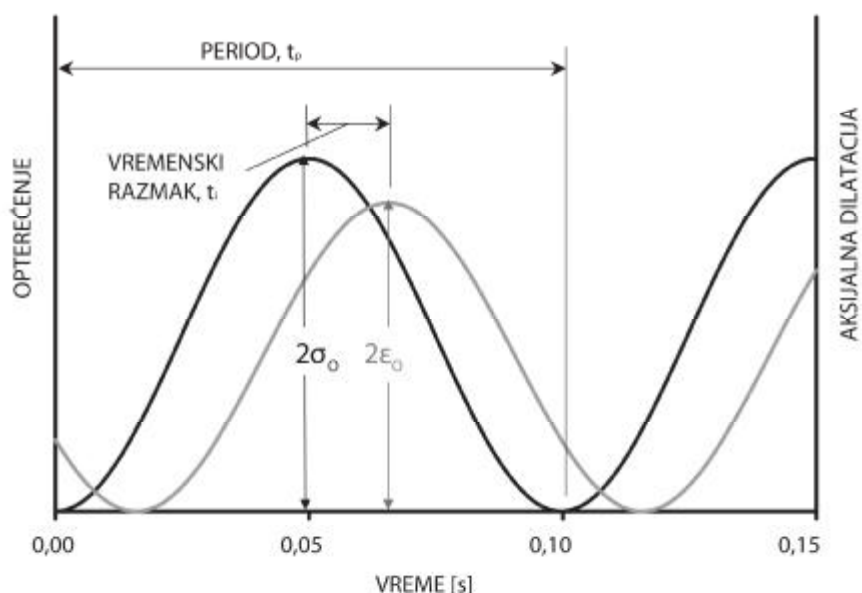
while the phase angle is defined as:

where:

t_i - time lag between peak stress and peak strain, [s]
 t_p - time lag between two cycles of stress, e.g. strain (period), [s]
 i - imaginary number
 Expressed by real and imaginary part:

E' as a complex modulus component is usually called elasticity or storage modulus, while E'' is called loss or viscosity modulus. The phase angle, φ , is the angle by which ε_0 lags behind σ_0 . It is an indicator of viscous characteristics of the material being evaluated.

For a purely elastic material, $\varphi = 0^\circ$, it can be seen that the complex modulus (E^*) is equal to the absolute value, i.e. to the dynamic modulus. For purely viscous material, $\varphi = 90^\circ$. Testing of asphalt mixtures dynamic modulus is performed by using a pattern of uniaxial applied sinusoidal stress as it is shown in Figure 2.



Slika 2 - Tipičan izgled dijagrama napona i dilatacija u toku ispitivanja dinamičkog modula [8]
 Figure 2 - Typical appearance of stress-strain diagram during a dynamic modulus testing [8]

2.1 Skraćeni postupak ispitivanje master kriva dinamičkog modula

Skraćeni postupak ispitivanje za dobijanje master kriva dinamičkog modula je razvijeno radi olakšanja samih ispitivanja i smanjenja koštanja opreme prilikom strukturnog projektovanja kolovoznih konstrukcija. Ovaj postupak se sastoji od ispitivanja na najmanje dva probna tela na temperaturama od -10 , $+4,4$, $21,1$, $37,8$, i $54,4$ °C i na frekvencama opterećenja od 25, 10, 5, 1, 0,5, i 0,1 Hz. Ovim ispitivanjima se formira baza podataka od 60 merenja dinamičkog modula od kojih se numeričkom optimizacijom određuju parametri za master krive [5].

Da bi ovaj protokol mogao da se koristi za rutinska ispitivanja, ukupno vreme potrebno za obavljanje opita je moralo da bude skraćeno [9]. Prihvatljive master krive se mogu razviti i ispitivanjem na samo tri temperature: -10 , $21,1$, i $54,4$ °C, pri frekvencama opterećenja od 33, 2,22, 0,15, i 0,01 Hz. Takav skraćeni postupak i dalje zahteva ispitivanje na temperaturi od -10 °C što se smatra komplikovanim s obzirom na kondenzaciju vlage i stvaranje leda [5]. Uz to, ispitivanje na niskoj temperaturi značajno povećava cenu klimatizacione komore i opreme za ispitivanje, i zahteva veće opterećenje [5]. Ukoliko bi ispitivanje na ovoj temperaturi moglo da se izostavi, pomenuti troškovi bi bili značajno smanjeni.

Ovaj skraćeni postupak razvoja master kriva uzima u obzir prednost činjenice da sva bitumenska veziva dostižu približno isti staklasti modul na veoma niskim temperaturama [5]. Korišćenjem ovog modula veziva i nedavno razvijenih veza za predviđanje dinamičkog modula mešavine preko modula bitumena i podataka o zapreminskim karakteristikama mešavine, može se napraviti procena graničnog maksimalnog modula mešavine i upotrebiti u razvoju master krive dinamičkog modula [5].

2.1 Abbreviated Dynamic Modulus Master Curve Testing Procedure

Abbreviated testing procedure for obtaining dynamic modulus master curves has been developed in order to facilitate the testing and reduce equipment costs during structural design of pavement structures. This procedure consists of testing on at least two specimens at temperatures of -10 , $+4,4$, $21,1$, $37,8$, and $54,4$ °C and on the loading frequencies of 25, 10, 5, 1, 0,5, and 0,1 Hz. By these tests, a database of 60 measurements of dynamic modulus is formed, from which parameters for master curves are determined by numerical optimisation [5].

To use this testing protocol in routine practice, total time needed for performing the test had to be reduced [9]. Acceptable master curves could also be obtained by testing at just three temperatures: -10 , $21,1$, and $54,4$ °C, at loading frequencies of 33, 2,22, 0,15, and 0,01 Hz. That reduced procedure also requires testing at the temperature of -10 °C what is considered complicated regarding the moisture condensation and ice formation [5]. Additionally, low temperature testing significantly increases the price of the environmental chamber and the testing equipment, and requires increased loading capacity [5]. If testing at this temperature could be excluded, the mentioned costs would be significantly reduced.

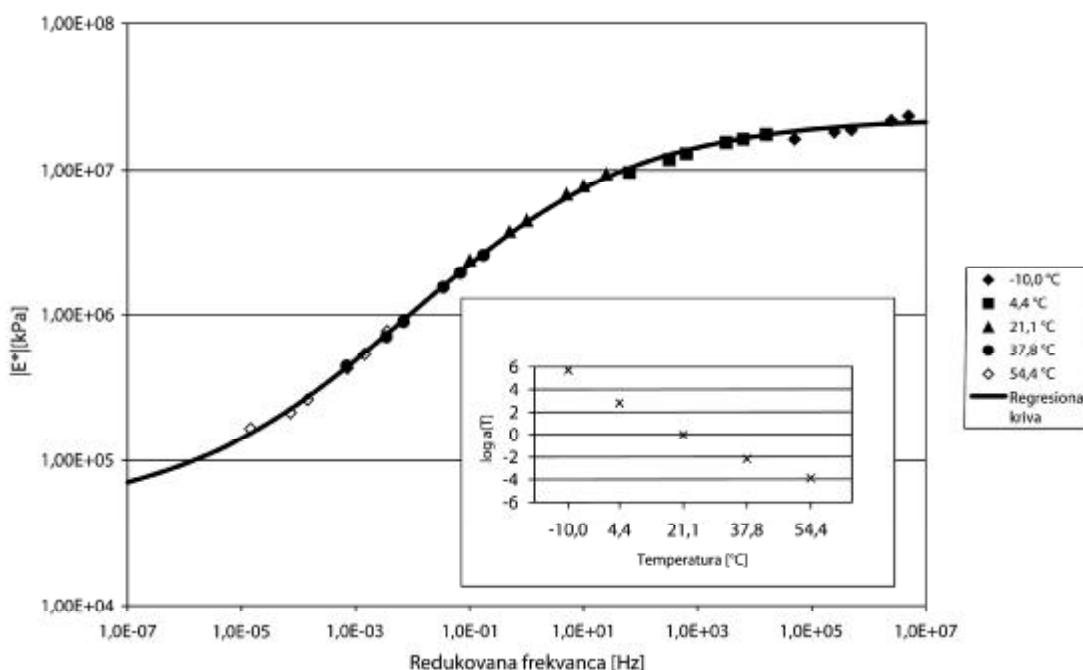
This reduced master curve development procedure considers the advantage of the fact that all bituminous binders achieve approximately the same glassy modulus at very low temperatures [5]. By using of this binder modulus and recently developed relationships for mixture dynamic modulus prediction from binder modulus and mixture volumetric characteristics data, an estimation of limiting maximum mixture modulus can be made and used in dynamic modulus master curves development [5].

2.1.1 MEPDG master kriva dinamičkog modula

Radi uvođenja u proračun temperature i brzine opterećenja, MEPDG koristi module asfaltne mešavine dobijene sa master krive konstruisane za referentnu temperaturu od 21,1 °C [6]. Master krive se konstruišu korišćenjem principa vremensko-temperaturne superpozicije. Prvo se odabere standardna referentna temperatura, u ovom slučaju 21,1 °C, zatim se podaci na različitim temperaturama pomeraju u odnosu na frekvencu opterećenja, sve dok se krive ne spoje u jedinstvenu glatku funkciju. Napravljena na ovaj način, master kriva modula u funkciji od frekvence opisuje ponašanje materijala samo u zavisnosti od frekvence. Veličina pomeranja za svaku temperaturu potrebna za formiranje master krive opisuje temperaturnu zavisnost ponašanja materijala. Stoga su za potpuno opisivanje uticaja brzine opterećenja i temperature potrebni i master kriva i faktori pomeranja. Na slici 3 je dat primer konstruisanja master krive na ovaj način.

2.1.1 MEPDG Dynamic Modulus Master Curve

For taking into account the temperature and loading rate, MEPDG asphalt mixture moduli obtained from the master curve constructed at a reference temperature of 21,1 °C [6]. Master curves are constructed by using time-temperature superposition principle. First, standard reference temperature is selected, in this case 21,1 °C, then the data at the various temperatures are shifted with respect to loading frequency, until the curves merge into a single smooth function. Made this way, modulus master curve as a function of the frequency describes material behaviour depending only on the frequency. Amount of shifting for each temperature needed for the construction of the master curve describes temperature dependent material behaviour. Hence, for complete description of impact of loading rate and temperature both master curve and shift factors are needed. Figure 3 gives an example of master curve construction in this way.



Slika 3 - Primer master krive dinamičkog modula sa dijagramom faktora pomeranja (ispitivanje na pet različitih temperatura) [5]

Figure 3 - Example of dynamic modulus master curve with shift factor diagram (testing at five different temperatures) [5]

U MEPDG se za opisivanje frekventne zavisnosti master krive modula koristi sigmoidalna funkcija data jednačinom 5.

Sigmoidal curve given by Equation 5 is used for describing modulus master curve frequency dependence in MEPDG.

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha_0}{1 + e^{\beta + \gamma \log \omega_r}} \quad (5)$$

gde je:

- $|E^*|$ - dinamički modul
- ω_r - redukovana frekvencija, [Hz]
- δ - minimalna granična vrednost $|E^*|$
- $\delta + \alpha$ - maksimalna granična vrednost $|E^*|$
- β, γ - parametri koji opisuju oblik sigmoidalne funkcije

where:

- $|E^*|$ - dynamic modulus
- ω_r - reduced frequency, [Hz]
- δ - limiting minimum value of $|E^*|$
- $\delta + \alpha$ - limiting maximum value of $|E^*|$
- β, γ - parameters that describe shape of the sigmoidal function

Istraživanja su pokazala da parametri δ i α zavise od granulometrijskog sastava agregata, sadržaja veziva, i šupljina. Parametri β i γ zavise od karakteristika bitumenskog veziva i veličina δ i α [5]. U jednačini 5, temperaturna zavisnost modula je ugrađena u parametar redukovane frekvence, ω_r . Jednačina 6 definiše redukovanu frekvencu kao stvarnu frekvencu opterećenja pomnoženu vremensko-temperaturnim faktorom pomeranja, $a(T)$.

$$\omega_r = a(T) \omega \quad (6a)$$

$$\log \omega_r = \log \omega + \log a(T) \quad (6b)$$

gde je:

ω - frekvencija opterećenja, [Hz]
 $a(T)$ - faktor pomeranja kao funkcija temperature
 T - temperatura

U pokušaju davanja racionalnog objašnjenja temperaturne zavisnosti faktora pomeranja, preporučivane su različite jednačine kao što su Arrheniusova (Arrhenius) funkcija i Viliams-Landel-Ferijeva (Williams-Landel-Ferry, WLF) jednačina. U MEPDG, radi omogućavanja uzimanja obzir starenja tokom životnog veka kolovozne konstrukcije faktori pomeranja su izraženi u funkciji viskoziteta veziva. Jednačinom 7 je data veza faktora pomeranja primenjena u MEPDG.

$$\log a(T) = c (\log \eta - \log \eta_{70, RTFOT}) \quad (7)$$

gde je:

η - viskozitet pri posmatranoj ostarelosti i temperaturi
 $\eta_{70, RTFOT}$ - viskozitet na referentnoj temperaturi od 21,1 °C veziva ostarelog u RTFOT uređaju
 c - regresioni parametar

Viskozitet u funkciji od temperature se može izraziti korišćenjem veze viskoziteta i temperature date u ASTM D2493 [10].

$$\log \log \eta = A + VTS \log T_R \quad (8)$$

gde je:

η - viskozitet, [cP], cP = $1 \cdot 10^{-3}$ Pa · s
 T_R - temperatura u Rankinima, [R], R = 1,8 (°C + 273,15)

A - regresioni parametar (preseka sa ordinatom)
 VTS - regresioni parametar (nagib linije zavisnosti viskoziteta od temperature)

Kombinovanjem jednačina 7 i 8 sledi faktor pomeranja kao funkcija temperature koji se koristi u MEPDG za konstruisanje master krive. Zamenom tako dobijene jednačine u jednačinu 5, sledi funkcija zavisnosti master krive dinamičkog modula od podataka dobijenih laboratorijskim ispitivanjem.

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \left[\log \omega + c \left(10^{A + VTS \log T_R} - \log \eta_{70, RTFOT} \right) \right]}} \quad (9)$$

Regresioni parametri (α , β , δ , γ , i c) se određuju kroz numeričku optimizaciju jednačine 9 korišćenjem podataka iz laboratorijskih ispitivanja. Zbog ograničenja u pogledu opreme, ni granični najveći ni granični najmanji modul se direktno ne mogu izmeriti, pa se stoga moraju proceniti u postupku regresione analize.

Researches have shown that the parameters δ and α depend on aggregate gradation, binder content, and voids. Parameters β and γ depend on bituminous binder characteristics and the values of δ and α [5]. In Equation 5, temperature dependence of modulus is implemented in reduced frequency parameter, ω_r . Equation 6 defines the reduced frequency as the exact loading frequency multiplied by time-temperature shift factor, $a(T)$.

where:

ω - loading frequency, [Hz]
 $a(T)$ - shift factor as a function of temperature
 T - temperature

In the attempt to give rational explanation of shift factor temperature dependence, various equations have been recommended such as Arrhenius function and Williams-Landel-Ferry (WLF) equation. In MEPDG, in order to facilitate consideration of ageing during the pavement life cycle shift factors are expressed in terms of binder viscosity. Shift factor relationship applied in MEPDG is given by Equation 7.

where:

η - viscosity at age and temperature of interest
 $\eta_{70, RTFOT}$ - viscosity at the reference temperature of 21,1 °C RTFO aged binder
 c - regression parameter

Viscosity as a function of temperature could be expressed by using the relationship of viscosity and temperature provided in ASTM D2493 [10].

where:

η - viscosity, [cP], cP = $1 \cdot 10^{-3}$ Pa · s
 T_R - temperature in Rankine, [R], R = 1,8 (°C + 273,15)

A - regression parameter (intercept)
 VTS - regression parameter (slope of viscosity-temperature relationship)

Combining Equations 7 and 8, yields a shift factor as a temperature function that is used in MEPDG for dynamic modulus master curve construction. Replacing such obtained equation into Equation 5, yields the dynamic modulus master curve dependence function from laboratory testing obtained data.

Regression parameters (α , β , δ , γ , and c) are determined through numerical optimization of Equation 9 using the data from the laboratory testing. Because of limitations in equipment, neither limiting maximum nor limiting minimum modulus could directly be measured, therefore they have to be estimated in the process of regression analysis.

2.1.2 Predložena modifikacija postupka određivanja master krive dinamičkog modula

Predložena modifikacija se sastoji u tome da se na osnovu krutosti veziva i zapreminskih karakteristika mešavine pomoću Hiršovog (Hirsch) modela proceni granični maksimalni modul mešavine [5]. Za poznati granični maksimalni modul, MEPDG veza master krive data jednačinom 6 se redukuje na:

$$\log |E^*| = \delta + \frac{Max - \delta}{1 + e^{\beta} + \gamma \left[\log \omega + c \left(10^{A + VTS \log T_R} - \log \eta_{70, RTFOT} \right) \right]} \quad (10)$$

gde je:

Max - dati maksimalni granični modul

Četiri nepoznata regresiona parametra se i dalje procenjuju numeričkom optimizacijom na osnovu podataka sa ispitivanja, ali, kako je granični maksimalni modul dat, podaci sa niskih temperatura više nisu potrebni.

Jednačine (11) i (12) prikazuju Hiršov model koji omogućava procenu modula mešavine na osnovu podatka o krutosti veziva i zapreminskih karakteristika mešavine.

$$|E^*|_{mix} = P_c \left[4200000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 |G^*|_{binder} \left(\frac{VFA \cdot VMA}{10000} \right) \right] + \frac{1 - P_c}{\left[\frac{\left(1 - \frac{VMA}{100} \right)}{4200000} + \frac{VMA}{3 VFA |G^*|_{binder}} \right]} \quad (11)$$

gde je:

where:

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{VFA \cdot 3 |G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0,58}}{650 + \left(\frac{VFA \cdot 3 |G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0,58}} \quad (12)$$

$|E^*|_{mix}$ - dinamički modul mešavine

VMA - šupljine u mineralnom agregatu, [%]

VFA - šupljine ispunjene bitumenom, [%]

$|G^*|_{binder}$ - dinamički modul smicanja veziva, [psi], (psi = 6,894 757 kPa)

Na osnovu istraživanja sprovedenih tokom SHRP, sva veziva dostižu maksimalni modul smicanja od približno 1 GPa [5]. Zamenom ovih vrednosti u jednačine 11 i 12 sledi preporučena jednačina za procenu graničnog maksimalnog modula asfaltne mešavine na osnovu podataka o zapreminskim karakteristikama.

$|E^*|_{mix}$ - mixture dynamic modulus

VMA - voids in mineral aggregate, [%]

VFA - voids filled with bitumen, [%]

$|G^*|_{binder}$ - dynamic shear modulus of binder, [psi], (psi = 6,894 757 kPa)

According to the researches conducted during the SHRP, all binders achieve approximately the same dynamic shear modulus of about 1 GPa [5]. Replacing these values into Equations 11 and 12 yields proposed equation for estimation of limiting maximum modulus of asphalt mixture based on volumetric characteristics data.

$$|E^*|_{max} = P_c \left[4200000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 435000 \left(\frac{VFA \cdot VMA}{10000} \right) \right] + \frac{1 - P_c}{\left[\frac{\left(1 - \frac{VMA}{100} \right)}{4200000} + \frac{VMA}{435000 VFA} \right]} \quad (13)$$

gde je:

where:

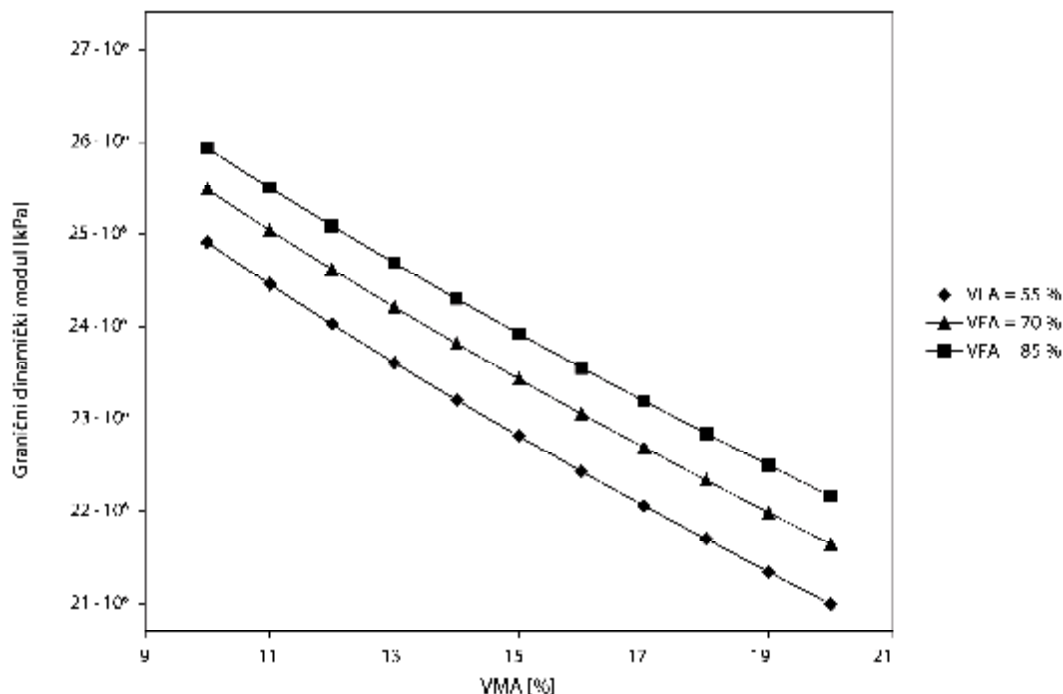
$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{435000 VFA}{VMA}\right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{435000 VFA}{VMA}\right)^{0.58}} \quad (14)$$

$|E^*|_{max}$ - granični maksimalni dinamički modul mešavine

Na slici 4 je prikazan granični maksimalni modul sračunat korišćenjem jednačine 13 za VMA u rasponu od 10 do 20 % i VFA u rasponu od 55 do 85 %. Za ovako širok raspon zapreminskih karakteristika, granični maksimalni modul se kreće u granicama od oko 20 do oko 27 GPa. Za uslove sa malim udelom šupljina u mineralnom agregatu (VMA) i velikim udelom šupljina ispunjenih bitumenom (VFA), granični maksimalni modul se približava vrednostima koje su bliske vrednostima tipičnim za cementni beton.

$|E^*|_{max}$ - limiting maximum dynamic modulus of asphalt mixture

Figure 4 shows limiting maximum modulus calculated by using Equation 13 for VMA in the range of 10 to 20 % and VFA in the range of 55 to 85 %. For such a wide range of volumetric characteristics like this, limiting maximum modulus values ranges from about 20 to about 27 GPa. For conditions with low voids in mineral aggregate (VMA) and high voids filled with bitumen (VFA) content, limiting maximum modulus is approaching values that are near to values typical for portland cement concrete.



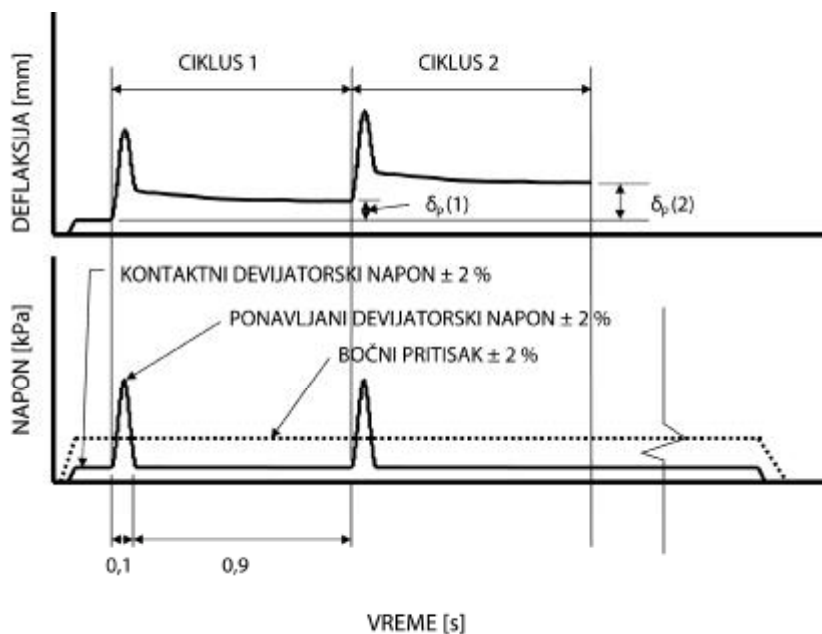
Slika 4 - Vrednosti graničnog maksimalnog dinamičkog modula dobijene Hiršovim modelom [5]
Figure 4 - Limiting maximum dynamic modulus values obtained by Hirsch model [5]

3 OPIT TRAJNE DEFORMACIJE SA PONAVLJANIM OPTEREĆENJEM - FLOW NUMBER (F_N)

Jedan od pristupa u određivanju karakteristika u pogledu otpornosti na trajne deformacije asfaltnih materijala je nanošenje ponavljano opterećenja sa nekoliko hiljada ponavljanja i praćenje kumulativne trajne deformacije u funkciji od broja ponavljanja (ciklusa) opterećenja. Tokom ispitivanja u trajanju od oko 3 h, naizmenično se primenjuje sinusoidno pulsno opterećenje tokom 0,1 s i rasterećenje od 0,9 s (vreme relaksacije). Rezultat ovakvog pristupa je približno 10 000 ciklusa opterećenja nanetih na probno telo [2], [11]. Na slici 5 je prikazana šema ponavljano opterećenja koje se koristi pri ovom ispitivanju.

3 REPEATED LOAD PERMANENT DEFORMATION TEST - FLOW NUMBER (F_N)

One of the approaches in determination of asphalt materials permanent deformation resistance characteristics is the application of repeated load with several thousand repetitions and observation of cumulative deformation as a function of load repetition number (cycles). During the about 3 h testing, sinusoidal pulse 0,1 s loading is alternately applied with 0,9 s relaxation (relaxation time). The result of such approach is approximately 10 000 loading cycles applied on a specimen [2], [11]. Figure 5 shows repeated load pattern that is used in this test.



Slika 5 - Šema opterećenja i dobijeni podaci o ugibu (defleksiji) pri opitu trajne deformacije sa ponavljanim opterećenjem (F_n) [8]

Figure 5 - Load pattern and obtained results about deflection during the repeated load permanent deformation test (F_n) [8]

Putem F_n opita se može dobiti nekoliko parametara koji opisuju trajnu deformaciju.

Istraživanjima je uočeno da se, generalno, ponašanje asfaltnih materijala u pogledu trajne deformacije pod datim uslovima materijala, opterećenja, i okoline, može se posmatrati u okviru tri različite faze [1], [2], [3]:

1. Primarna faza - Početan visok nivo trajnih deformacija (kolotruga) sa opadajućim prirastom, prevashodno povezano sa promenom zapremine

2. Sekundarna faza - Konstantan mali prirast trajnih deformacija (kolotruga) koji je povezan sa zapreminskim promenama, dok međutim, deformacije usled smicanja imaju sve veći prirast

3. Tercijarna faza - Visok nivo trajnih deformacija prevashodno povezanih sa plastičnim deformacijama usled smicanja u uslovima nepromenjene zapremine

Slika 6 ilustruje tipičnu vezu kumulativne trajne dilatacije i broja ponavljanja opterećenja. Broj ponavljanja opterećenja, pri kojem nastaje tercijarno tečenje naziva se broj tečenja (flow number) i označava sa F_n . Na dijagramu je ovo mesto označeno kao tačka tečenja.

Kumulativna trajna dilatacija, ϵ_p , u odnosu na broj ciklusa N se može okarakterisati korišćenjem stepenog modela:

$$\epsilon_p = a N^b \quad (15)$$

gde su a i b regresione konstante koje zavise od materijala i uslova ispitivanja, i koje, redom, predstavljaju presek sa ordinatom i nagib tangente pri transformaciji $\log \epsilon = \log a + b \log N$. Mora se naznačiti da se parametri a i b dobijaju sa linearnog (sekundarnog) dela krive kumulativne plastične dilatacije u odnosu na broj ciklusa opterećenja koja se crta u log-log razmeri. Pri

Several parameters describing permanent deformation could be obtained by F_n test.

Research has identified that, generally, permanent deformation performance of asphalt mixtures under given material, loading, and environmental conditions could be observed in three different stages [1], [2], [3]:

1. Primary Stage - High initial level of permanent deformation (rutting) with decreasing rate, predominantly associated with change in volume

2. Secondary Stage - Constant low permanent deformation (rutting) rate which is associated with volumetric changes, while however, shear deformation rate increases

3. Tertiary Stage - High level of permanent deformation predominantly associated with plastic deformations due to shear in unchanged volume conditions

Figure 6 illustrates typical relationship between cumulative permanent deformation and load repetitions number. Load repetitions number, in which tertiary flow occurs is named flow number and is assigned as F_n . On the diagram, this place is marked as flow point.

Cumulative permanent strain, ϵ_p , in terms of cycle number N could be characterized by using power law

where a and b are regression constants that depend on material and testing conditions, and which respectively represent intercept with ordinate, and tangent slope due to transformation $\log \epsilon = \log a + b \log N$. It should be noticed that parameters a and b are obtained from the linear (secondary) part of cumulative plastic strain curve as a function of load repetitions cycle number which is

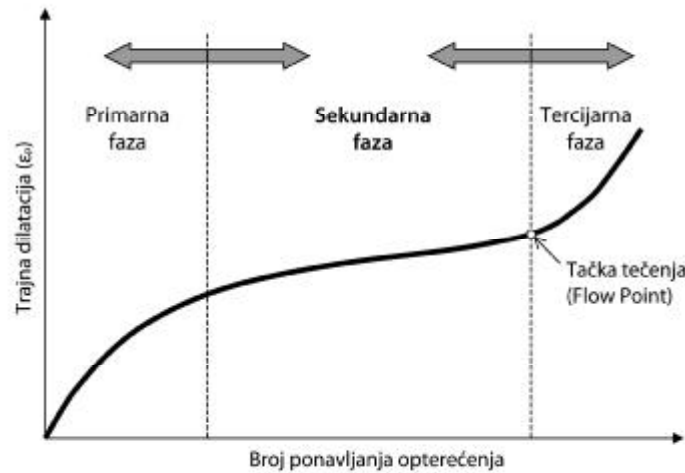
ovom se zanemaruje početni primarni prolazni odgovor i konačna tercijarna nestabilnost. Parametar a predstavlja trajnu dilataciju kada je $N = 1$, a b , prirast promene trajne dilatacije u funkciji od broja ciklusa opterećenja, $\log N$. Za karakterizaciju porasta plastične dilatacije pri jednom ponavljanju opterećenja, ε_{pn} , može se koristiti alternativni matematički model:

$$\frac{d\varepsilon_p}{dN} = \varepsilon_{pn} = \frac{d(a N^b)}{dN} \quad (16)$$

ili

or

$$\varepsilon_{pn} = a b N^{b-1} \quad (17)$$



Slika 6 - Tipična zavisnost između kumulativne trajne deformacije i broja ponavljanja opterećenja [8]
Figure 6 - Typical relationship between cumulative permanent deformation and load repetitions number [8]

Generalno se pretpostavlja da je povratna dilatacija, ε_r nezavisna u odnosu na broj ponavljanja opterećenja, N , pa se odnos plastične i elastične dilatacije može izraziti kao

Generally, it is assumed that the recoverable strain, ε_r is independent from the number of load repetitions, N , so the plastic-to-elastic strain ratio could be expressed as:

$$\frac{\varepsilon_{pn}}{\varepsilon_r} = \left(\frac{a b}{\varepsilon_r} \right) N^{b-1} \quad (18)$$

Smenom $\mu = \frac{a b}{\varepsilon_r}$ i $\alpha = 1 - b$, dobija se:

Replacing $\mu = \frac{a b}{\varepsilon_r}$ and $\alpha = 1 - b$, yields:

$$\frac{\varepsilon_{pn}}{\varepsilon_r} = \mu N^{-\alpha} \quad (19)$$

gde je:

ε_{pn} - prirast plastične dilatacija usled N -tog nanošenja opterećenja

μ - odnos plastične i elastične dilatacije kada je $N=1$

α - stopa opadanja prirasta trajne deformacije sa povećanjem broja ponavljanja opterećenja

Na slici 7 je prikazana trajna dilatacija u funkciji broja ponavljanja opterećenja u opitu trajne deformacije sa ponavljanim opterećenjem (flow number).

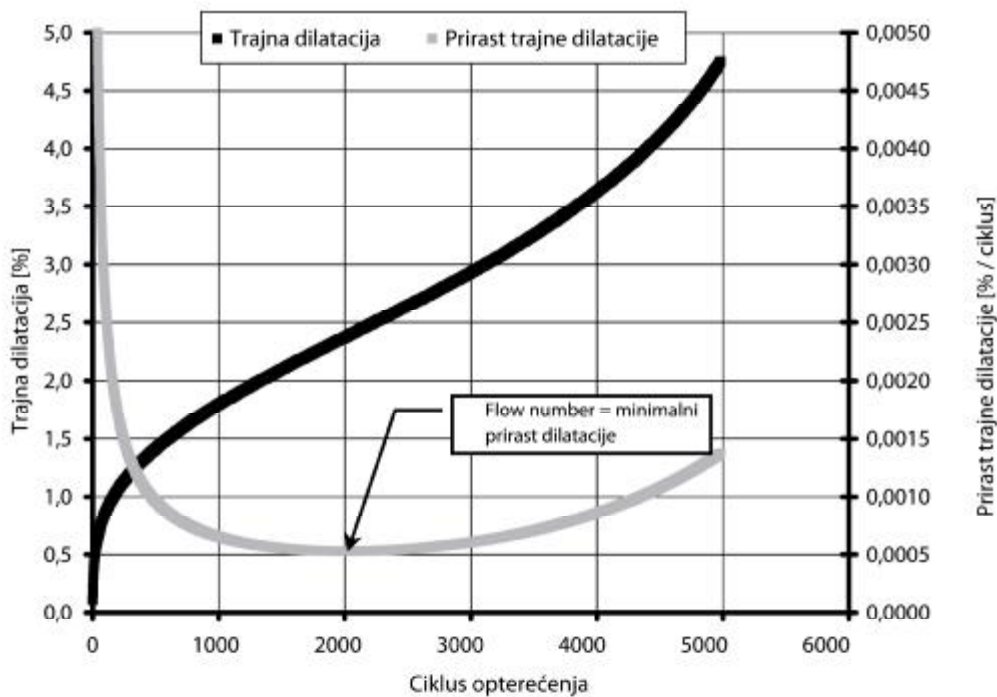
where:

ε_{pn} - plastic strain rate due to N -the load application

μ - plastic to elastic strain ratio when $N = 1$

α - permanent deformation decrease rate with increase of load repetitions number

Figure 7 shows permanent strain as a function of load repetitions number in repeated loading permanent deformation test (flow number).



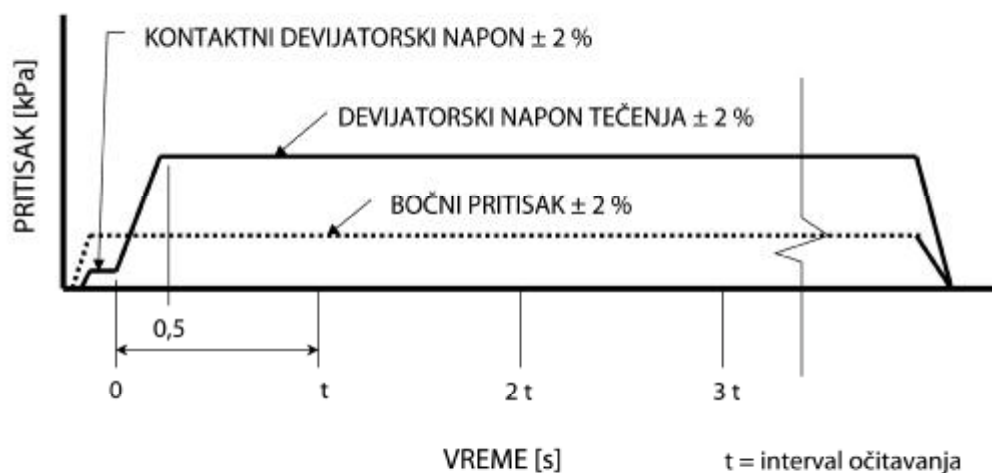
Slika 7 - Kriva trajne dilatacije i njenog prirasta pri opitu trajne deformacije sa ponavljanim opterećenjem [8]
 Figure 7 - Curves of permanent strain and its rate in repeated loading permanent deformation test [8]

4 OPIT TRAJNE DEFORMACIJE SA STATIČKIM OPTEREĆENJEM - FLOW TIME (F_T)

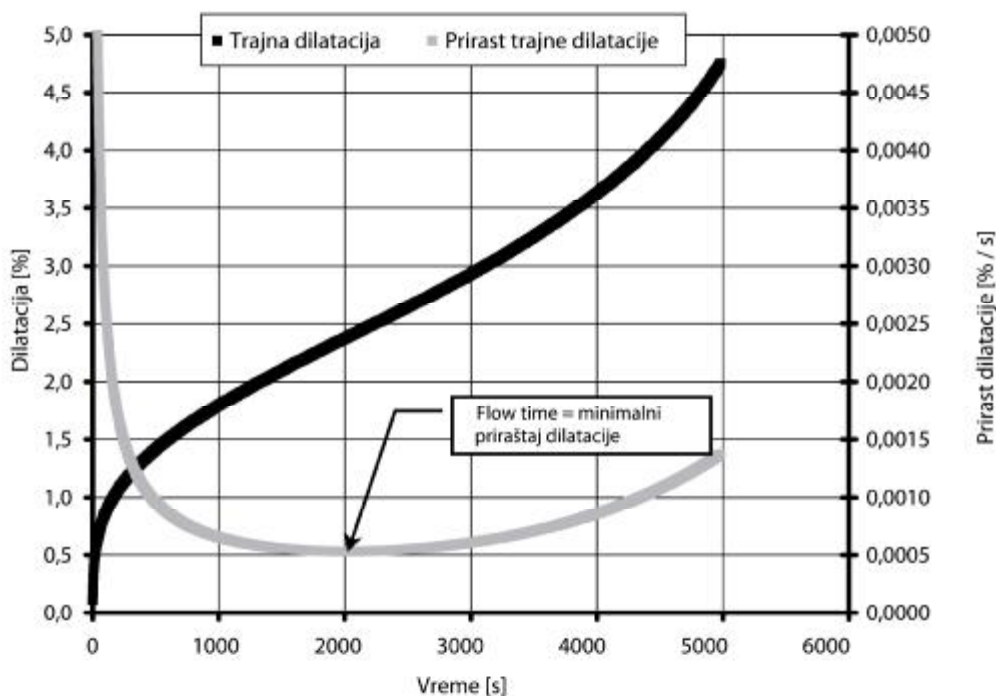
Na slici 8 je prikazana šema statičkog opterećenja koje se koristi pri opitu trajne deformacije sa statičkim opterećenjem, a na slici 9 su prikazani tipični rezultati ispitivanja recipročne vrednosti modula, $D(t) = \epsilon(t) / \sigma$, u funkciji od vremena. Slično kao u slučaju opita sa ponavljanim opterećenjem, ovde se može uočiti da se kriva recipročne vrednosti modula može podeliti na tri osnovne faze: primarno, sekundarno, i tercijarno tečenje. Za uslove konstantnog napona od opterećenja, tokom faze primarnog tečenja, prirast dilatacije tečenja i promene

4 STATIC LOADING PERMANENT DEFORMATION TEST - FLOW TIME (F_T)

Figure 8 shows static loading pattern which is used in static loading permanent deformation test, and Figure 8 shows typical results of creep compliance testing, $D(t) = \epsilon(t) / \sigma$, as a function of time. Similar to the repeated loading test, here can be seen that the creep compliance curve can be divided into three basic stages: primary, secondary, and tertiary flow. For constant loading stress conditions, during the primary stage, flow strain rate and creep compliance rate decrease with time, they are approximately constant during the secondary stage, and



Slika 8 - Šema statičkog opterećenja pri opitu trajne deformacije sa statičkim opterećenjem (F_T) [8]
 Figure 8 - Static loading pattern in static loading permanent deformation test (F_T) [8]



Slika 9 - Primer rezultata ispitivanja trajne deformacije (recipročne vrednosti modula) u funkciji od vremena pri opitu trajne deformacije sa statičkim tečenjem [8]
 Figure 9 - Example of permanent deformation (creep compliance) testing as the function of time in static loading permanent deformation test [8]

recipročne vrednosti modula opadaju sa vremenom, približno su konstantni tokom faze sekundarnog, a rastu tokom faze tercijarnog tečenja. Pri niskim nivoima opterećenja, asfaltni beton mahom ispoljava primarno tečenje, tj., prirast tečenja polako opada do nule kako se ukupna dilatacija asimptotski teži graničnoj vrednosti. Ovo takođe ukazuje da se prirast tečenja u sekundarnoj fazi takođe može približiti nuli pri malim naprezanjima. Na višim nivoima naprezanja, konstantni prirast tečenja sekundarne faze će zavistiti od veličine nanetog opterećenja.

Veliki porast recipročne vrednosti modula u toku tercijarne faze tečenja se, generalno, dešava pri konstantnoj zapremini. Stoga je vreme tečenja, F_t , definisano kao vreme na početku deformacija usled smicanja pri konstantnoj zapremini. Vreme tečenja se takođe može uočiti i kao tačka minimuma na dijagramu prirasta recipročne vrednosti modula u odnosu na vreme trajanja opterećenja.

Vreme tečenja se u opitu sa statičkim opterećenjem može odrediti na sledeći način. Tačka najmanjeg nagiba krive se na vremenskoj osi, koja je u logaritamskoj razmeri, se uoči kao vreme t . Zatim se za dato vreme t uoči veći broj tačaka na krivi, za koje se, u cilju dobijanja glatke krive, izvrši regresija. Oblik regresione krive je:

$$D(t) = a + bt + ct^2 \quad (20)$$

gde je:

t - vreme

$D(t)$ - recipročna vrednost modula u okolini tačke t na glatkoj krivi

a, b, c - regresioni parametri

where:

t - time

$D(t)$ - creep compliance surrounding the point t on the smooth curve

a, b, c - regression parameters

are increasing during the tertiary stage flow. In low stress conditions, asphalt concrete experiences primary flow mostly, i.e., flow rate slowly decreases to zero as the total strain asymptotically aims to limit value. This also suggests that in low stress flow rate in secondary stage can also reach zero. On higher stress levels, constant secondary flow rate will depend on applied load.

Considerable creep compliance rate during the tertiary stage flow, generally, occurs in constant volume. Therefore, flow time, F_t , is defined as a time at the beginning of shear deformation in constant volume. Flow time could also be noticed as the point of minimum at creep compliance in terms of loading time diagram.

Flow time can be determined in static load test as follows. Point at minimum curve slope is on the time axis, which is in log scale, identified as time t . Then, for given time t a larger number of points is identified on the curve, for which, in order to obtain a smooth curve, a regression analysis is performed. The form of the regression curve is:

Nalaženjem izvoda:

Finding the derivation:

$$\frac{d(D(t))}{dt} = b + 2 c t \quad (21)$$

prirast recipročne vrednosti modula u tački t_i na glatkoj krivi je jednak $b + 2 c t_i$. Ovim postupkom se može dobiti prirast recipročne vrednosti modula kroz čitav posmatrani vremenski opseg. Vreme u kome je ovaj prirast jednak nuli, tj. vreme kada počinje da raste, je definisano kao vreme tečenja, F_i .

Creep compliance rate at point t_i on the smooth curve is equal to $b + 2 c t_i$. By this procedure creep compliance rate could be obtained through the complete time range observed. The time in which this rate is equal to zero, e.g. the time when it starts increasing, is defined as flow time, F_i .

5 ZAKLJUČAK

U okviru NCHRP projekta 9-19 (Podrška Superpave-u i upravljanje modelima ponašanja) su predložena tri SPT opita kao dopuna Superpave metodi zapremnog projektovanja mešavina. U ova ispitivanja spadaju: dinamički modul (E^*), opit trajne deformacije sa ponavljanim opterećenjem - flow number (F_n), i opit trajne deformacije sa statičkim opterećenjem - flow time (F_t). Predložena ispitivanja se sprovode pri jednoaksijalnoj ili triaksijalnoj kompresiji na cilindričnim probnim telima dobijenim isecanjem i jezgrovanjem uzoraka većih dimenzija dobijenih žiroskopskim sabijanjem. Podaci sa sva tri ispitivanja pokazuju dobru korelaciju sa ponašanjem kolovoznih konstrukcija terenu, a kada je u pitanju dinamički modul, uočena je i mogućnost primene za karakterizaciju otpornosti na pukotine usled zamora [3]. Dinamički modul je takođe i glavni ulazni parametar materijala u okviru MEPDG, razvijenog u okviru NCHRP projekta 1-37A [6], [7]. U ovakav pristup ispitivanjima fundamentalnih mehaničkih karakteristika asfaltnih mešavina se uklapa i pristup kod drugih materijala kao što je, na primer, cementni beton [12]. Primena ovog ispitivanja kako za vrednovanje mešavine, tako i za strukturno projektovanje, daje potencijalnu vezu između projektovanja mešavine i strukturne analize, što je bio cilj u osnovi značajnog broja ranijih istraživanja fleksibilnih kolovoznih konstrukcija.

5 CONCLUSION

In NCHRP Project 9-19 ("Superpave Support and Performance Models Management") three SPT tests were proposed as a supplement to Superpave volumetric mixture design. These tests include: dynamic modulus (E^*), repeated load permanent deformation test - flow number (F_n), and static load permanent deformation test - flow time (F_t). Proposed tests are conducted in uniaxial or triaxial compression on cylindrical specimens obtained by sawing and coring of bigger dimensions samples obtained by gyratory compaction. The data from all three tests show good correlation to pavement field performance, and in case of dynamic modulus, the possibility for fatigue cracking resistance characterization is also noticed [3]. Dynamic modulus is also the main material input parameter in MEPDG, developed in NCHRP Project 1-37A [6], [7]. In this approach to testing of fundamental mechanical characteristics of asphalt mixtures fits also the approach for other materials as, e.g., Portland cement concrete is [12]. Application of these tests for mixture evaluation as for structural design provides a potential link between mixture design and structural analysis, that was an underlying goal of substantial amount of past flexible pavement researches.

6 LITERATURA REFERENCES

- [1] Witczak, M. W. NCHRP Report 580: Specification Criteria for Simple Performance Tests for Rutting: Volume I: Dynamic Modulus (E^*); Volume II: Flow Number and Flow Time. Transportation Research Board, Washington, DC, 2007.
- [2] Kim, Y. R.. Modeling of Asphalt Concrete. The American Society of Civil Engineers Reston, VA, 2009.
- [3] Witczak, M. W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M., Von Quintus, H.. NCHRP Report 465: Simple Performance Test for Superpave Mix Design. Transportation Research Board - National Research Council, Washington, DC, 2002.
- [4] Bonaquist, R. F., Christensen, D. W., Stump, W., III. NCHRP Report 513: Simple Performance Tester for Superpave Mix Design: First-Article Development and Evaluation. Transportation Research Board, Washington, DC, 2003.
- [5] Bonaquist, R. NCHRP Report 614: Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice. Transportation Research Board, Washington, DC, 2008.
- [6] ARA, Inc., ERES Consultants Division. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures: Final Report. Transportation Research Board, Washington, DC, 2004.
- [7] Miličević, A., Miljković, M. Pregled vodiča za mehaničko-empirijsko projektovanje novih i rehabilitovanih kolovoznih konstrukcija NCHRP 1-37A. Zbornik radova Građevinskog fakulteta, Niš, broj 23, 2008, str.105 – 117.
- [8] Bonaquist, R. NCHRP Report 629: Ruggedness Testing of the Dynamic Modulus and Flow Number Tests with the Simple Performance Tester. Transportation Research Board, Washington, DC, 2008.

- [9] Dougan, C. E., Stephens, J. E., Mahoney, J., Hansen, G. E* - Dynamic Modulus Test Protocol - Problems and Solutions. Connecticut Department of Transportation, . Rocky Hill, CT, 2003.
- [10] ASTM International. ASTM D2493-01, Standard Viscosity-Temperature Chart for Asphalts. West Conshohocken, PA, 2001.
- [11] Witczak, M. NCHRP Report 547: Simple Performance Tests: Summary of Recommended Methods and Database. Transportation Research Board, Washington, DC, 2005.
- [12] Vučković, B. Samougrađujući betoni - Reološka svojstva i upotreba. Materijali i konstrukcije, vol. 51, broj 3, Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije, Beograd, 2008, str. 45 – 50.

REZIME

FUNDAMENTALNE KARAKTERISTIKE ASFALTNIH MEŠAVINA U POGLEDU OTPORNOSTI NA TRAJNU DEFORMACIJU

Miomir MILJKOVIĆ

Kao dopuna Superpave[®] metodi zapremninskog projektovanja mešavina, predložena su tri, takozvana, SPT opita. Ovim opitima je obuhvaćeno određivanje dinamičkog modula, opit trajne deformacije sa ponavljanim opterećenjem, i opit trajne deformacije sa statičkim opterećenjem. Cilj ispitivanja je dobijanje boljeg uvida u ponašanje mešavina u fazi eksploatacije. Svako od ovih ispitivanja se sprovodi pri jednoaksijalnoj ili triaksijalnoj kompresiji cilindričnih probnih tela dobijenim obradom žiroskopski sabijenih uzoraka. Kada je u pitanju dinamički modul, uočena je i mogućnost njegove primene za karakterizaciju otpornosti na pukotine usled zamora. S obzirom da se prvobitna verzija opita koji je uključivao i ispitivanja na niskim temperaturama pokazao komplikovanim za izvođenje, razvijen je postupak kojim se merenja na ovim temperaturama mogu izbeći. Dinamički modul je takođe i glavni ulazni parametar materijala u okviru mehaničko-empirijskog pristupa projektovanju kolovoznih konstrukcija razvijenog u okviru NCHRP projekta 1-37A. Konačno, primena ovih ispitivanja daje potencijalnu vezu između projektovanja mešavine i strukturne analize, što je bio cilj u osnovi značajnog broja ranijih istraživanja fleksibilnih kolovoznih konstrukcija.

Ključne reči: kolovozne konstrukcije, asfaltne mešavine, trajne deformacije, kolotrazi, fundamentalne karakteristike, dinamički modul, master kriva, broj tečenja, vreme tečenja.

SUMMARY

FUNDAMENTAL ASPHALT MIXTURES CHARACTERISTICS REGARDING PERMANENT DEFORMATION RESISTANCE

Miomir MILJKOVIC

As an addition to Superpave[®] volumetric mixture design method, three, so called, SPT tests are proposed. These tests include determination of dynamic modulus, repeated load permanent deformation test, and static load permanent deformation test. The objective of the testing is to get better insight into field mixture performance. Each of these tests is carried out in uniaxial or triaxial compression of cylindrical specimens obtained by preparation of gyratory compacted specimens. In case of dynamic modulus, a potential of its application for characterisation of fatigue cracking is noticed. As the original version of the test, that also included testing at low temperatures, was found complicated to perform, a procedure was developed by which testing at these temperatures could be avoided. Dynamic modulus is also main material input parameter in mechanistic-empirical pavement design approach developed in NCHRP Project 1-37A. Finally, application of these tests provides a potential link between mixture design and structural analysis, that was an underlying goal of substantial amount of past flexible pavement researches.

Key words: pavement structures, asphalt mixtures, permanent deformation, rutting, fundamental characteristics, dynamic modulus, master curve, flow number, flow time.

ZABORAVLJENE TEHNOLOGIJE GRAĐENJA

FORGOTTEN CONSTRUCTION TECHNOLOGIES

Ratko MITROVIĆ

STRUČNI RAD
UDK: 693.21 = 861

1 UVOD

Najljepši objekti koji su izgrađeni na području Sredozemnog mora su palate i drugi reprezentativni objekti kod kojih je kao osnovni materijal korišćen kamen. Takvi objekti su drevne kamene palate u starom gradu Kotoru, Dubrovniku, Budvi, Ulcinju, a posebno predivna kamena zdanja u kapetanskom gradu Perastu. Fascinirajuće kamene fasade peraških palata su gradili uzorni pomorci i kapetani koji su živjeli u ovom gradu u različitim epohama. Njihovo stalno kretanje širom svijeta, bogastvo i slava su im omogućavali da grade najkvalitenije i naprestičnije objekte u periodu u kojem su živjeli. Takvi objekti su: zgrada muzeja u Perastu, Palata Vickovića, Palata Smekja, Palata Mazarovic i druge.

Osnovni cilj ovog rada je da prezentira javnosti ovu veoma interesantnu, a gotovo zaboravljenu tehnologiju građenja kod koje se kao osnovni materijal koriste kameni blokovi od krečnjačkih stijena, da bismo je, ne samo zaštitili od zaborava, nego i pokušali da proučimo mogućnost njene primjene u savremenim uslovima privređivanja, tj. kod izgradnje objekata visokogradnje.

Nakon analize osnovnih karakteristika ove tehnologije i mogućnosti njene primjene u današnjim uslovima građenja, daćemo predlog originalne tehnologije građenja koja će sadržati savremene tehnološke procese, a zadržati primjenu tradicionalnih alata i zanata, da bi se dobili oblici i forme drevnih kamenih fasada i unutrašnje dekoracije, a ujedno omogućila brža i ekonomičnija izgradnja ovakve vrste objekata.

1 INTRODUCTION

The most beautiful buildings constructed in the Mediterranean are the palaces and other representative buildings which used stone as a basic material. These buildings are ancient stone palaces in the old town of Kotor, Dubrovnik, Budva, Ulcinj, and particularly beautiful stone buildings in the captain's town of Perast. The fascinating stone frontages of the palaces of Perast were constructed by sailors and captains who lived in this town in different eras. Their continuous movement around the world, as well as their wealth and glory, enabled them to construct the most quality and the most prestigious buildings during their lifetime. These buildings are: the museum building in Perast, Vicković Palace, Smekja Palace, Mazarović Palace and others.

The basic aim of this paper is to present to the public this very interesting, almost forgotten construction technology which used stone blocks from limestone rocks as a basic material, not only to protect them from oblivion, but also to study the possibility of its usage in contemporary industrial conditions, i.e. in building construction.

After the analysis of basic characteristics of this technology and the possibilities of its usage in present construction conditions, we will propose the original construction technology which will contain modern technological processes, and retain the usage of traditional tools and trades to obtain shapes and forms of ancient stone frontages and interior decorations, and at the same time enable faster and more economic construction of these types of buildings.

Prof.dr Ratko Mitrović, Arhitektonski fakultet, ul. Džordža Vašingtona b.b. Podgorica, Crna Gora

PhD Ratko Mitrović, Faculty of Architecture, Džordža Vašingtona b.b. Podgorica

2 PRIKAZ I ANALIZA OVE DREVNE TEHNOLOGIJE GRAĐENJA

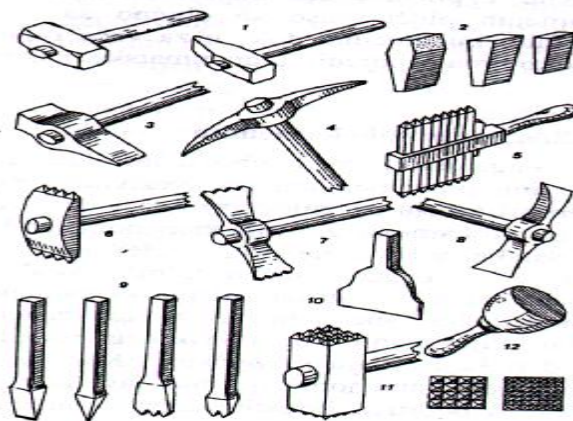
Kada se posmatraju stare kamene fasade stiče se utisak da one imaju dušu koju su im uklesali oni koji su utkali svoj znoj da bi objekat dobio željene i projektovane forme. Obrađivanje kamena zasnivalo se na ručnoj eksploataciji u majdanima i ručnoj obradi uz korištenje tradicionalnih alata koji se nijesu mijenjali hiljadama godina.

Za izgradnju pomenutih reprezentativnih objekata na ovim prostorima korišćene su karbonatne stijene od kojih su klesani kameni blokovi projektovanih dimenzija. Karakteristika ove tehnologije je da su se blokovi obrađivali u neposrednoj blizini majdana gdje je vršena eksploatacija materijala.

Sama tehnika eksploatacije kamena u majdanima je stara gotovo koliko i ljudska civilizacija i nije se znatno mijenjala do pojave eksploziva. Eksploatacija kamena se zasnivala na cijepanju prirodnih stijena putem metalnih klinova ili klinova od drveta koji su ubadani u rupe i natapani vodom, što je izazivalo povećanje zapremine drvenog klina a zatim cijepanja kamenih stijena u blokove željenih dimenzija.

Kamen je eksploatisan i obrađivan na tradicionalan način na ostrvima Brač, Korčula i td. i brodom transportovan do Perasta, Kotora i drugih mjesta na Primorju u kojima su se gradili objekti od ovog materijala. Ova tehnologija je bila veoma interesantna za stanovnike tih mjesta jer su svi oni, uglavnom, bili uzorni pomorci, pa im je transport brodom bio najprikladnije rješenje.

Na slici 1. je prikazan alat koji se koristio za eksploataciju kamena iz majdana i ručnu obradu.



Slika 1.
Figure 1.

Alat se sastojao od: čuskija, klinova, malja, macole, odbijača, škvadra, glijeta, matelina, cokade, raznih vrsta bruseva i drugog. Čuskije, maljevi i klinovi su korišćeni za eksploataciju kamena u majdanima, a za transport su se koristile oble cijevi, poluge, i konjska zaprega. Gruba obrada kamena je vršena raznim vrstama grubljih glijeta, odbijačima, martelinima sa više vrsta različitih zubaca i ugaonim škvadarima, a finija obrada cokadama sa više vrsta različitih zubaca i glijeta. Kod elemenata kod kojih je zatijevana preciznija obrada vršeno je fino ručno

2 PRESENTATION AND ANALYSIS OF THIS ANCIENT CONSTRUCTION TECHNOLOGY

When you observe the old stone frontages, you get the impression that they have souls of the persons who sweated to give to the buildings the desired and projected forms. Stone dressing was based on manual exploitation of quarries and manual dressing using traditional tools which haven't been changed for thousands of years.

For the construction of mentioned representative buildings in these areas carbonate rocks were used of which stone blocks with projected dimensions were carved. The characteristic of this technology is dressing of the blocks nearby the quarry where the exploitation of material was done.

The technique of exploitation of quarries is almost as old as human civilization and it hasn't changed significantly until the discovery of explosive. Stone exploitation is based on splitting of natural stones using metal wedges or wooden wedges stuck into the holes and soaked with water, which caused the increase of the size of wooden wedge, and then splitting of the stone into blocks with desired dimensions.

The stone was exploited and dressed in traditional way on the islands of Brač, Korčula etc. and transported by ships to Perast, Kotor and other places at the seaside where the buildings were constructed using this material. This technology was very interesting for the inhabitants of those places, because they were mostly model sailors, and, as a result, the transport by ship was the most appropriate solution.

In Figure 1 tools used for stone exploitation of the quarry and manual dressing are shown.

The tools consisted of: bars, wedges, ram, beetle, bumper, square, chisel, stone hammer, "cokada", different types of grinders and others. Bars, rams and wedges were used for stone exploitation of the quarries, while round pipes, levers and horse-car were used for transport. Dressing of rough stone was done using different types of rough chisels, bumpers, stone hammers with several types of teeth and angle squares, while finer dressing was done using "cokada" with several types of teeth and chisels. The elements which

brušenje i poliranje. Na slici 2 je prikazan tehnološki proces proizvodnje elemenata od kamena i izgradnje objekata u ovoj drevnoj tehnologiji.

Ova tehnologija je, u stvari, bila preteča savremenih industrijskih metoda građenja. Da bi se izgradio jedan ovakav objekat, prije obrade kamena se morala obraditi kompletna fasada i unutrašnji eneterijer, a projekti su bili tako detaljni da je svaki kameni blok koji se obrađivao imao precizno definisane dimenzije, formu i kamenu plastiku. Prije utovara u brod svaki kameni element je bio završno obrađen, jed se na licu mjesta vršila samo montaža i zidanje. Ova tehnologija je omogućavala projektantima da ostvare željena arhitektonska rješenja, koristeći klesarske vještine poznatih bračkih i drugih majstora ovog zanata.

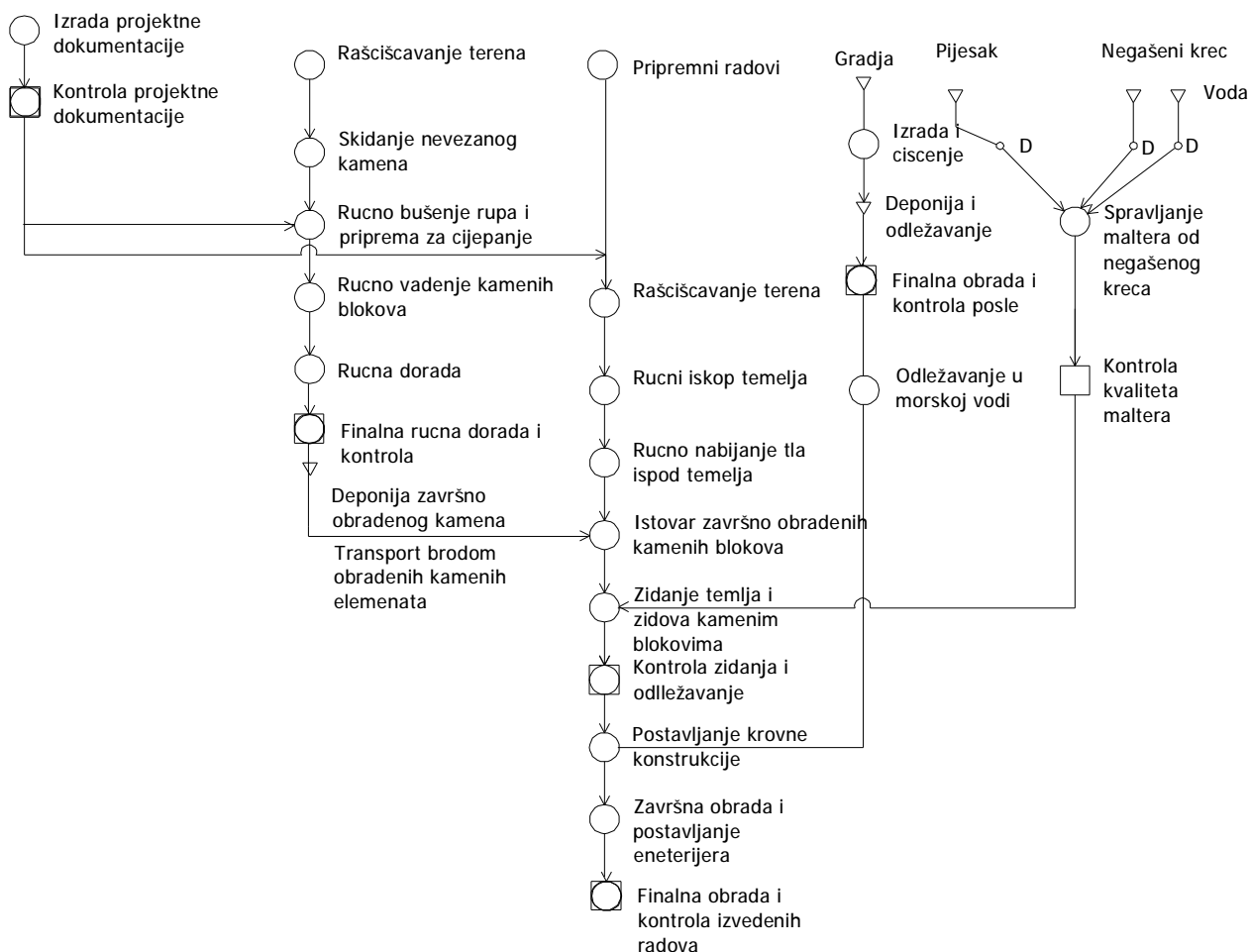
Osnovna karakteristika ove tehnologije građenja i njena originalnost je u tome što su se kameni blokovi od krečnjačke stijene međusobno povezivali negašenim krečom i na taj način su zidani svi zidovi na objektu. Tako ozidani kameni zidovi su ostavljani godinu dana da kisnu jer su se tako kameni blokovi isklesani od stijena kalcijumkarbonata međusobno spajali u jednu cjelinu.

need more precise dressing were exposed to fine manual grinding and polishing. In Figure 2 it is shown the technological production process of stone elements and construction of buildings using this ancient technology.

This technology, in fact, was the antecedent of contemporary industrial construction methods. In order to construct such building, before stone dressing the frontage and the interior should have been dressed and the projects were so detailed that each stone block for dressing had precisely defined dimensions, form and marble dimensions. Each stone element was finally dressed before the shipment, because only the assemblage and masonry works were done on the spot. This technology enabled the planners to realize the desired architecture solutions, using stonemason abilities of famous craftsmen from Brac and other places.

The basic characteristic of this construction technology and its originality is the fact that the blocks of limestone rock were bound with quicklime and all the walls of the building were built in that way. These stone

KARTA PROCESA ZA STARI TEHNOLOŠKI PROCES



Slika 2. Prikaz starog tehnološkog procesa izvođenja objekata od kamena
Figure 2 Demonstration of the old technological process for the construction of stone buildings

Za isto to vrijeme se prirodno osušena drvena građa za krovnu konstrukciju objekta ostavljala da odleži potopljena u more. Na ovaj način su se uništavali svi insekti u drvetu i trajno štitila drvena konstrukcija od njihovog dejstva. Nakon toga drvena konstrukcija se morala dobro osušiti u adekvatnim uslovima, a zatim su se izvodili krovopokrivački radovi.

Nakon završenih grubih izvođeni su zanatski radovi na tradicionalan način: malterisanje, postavljanje stolarije, izrada podova, ograda i drugi zanatski radovi.

3 PREZENTACIJA OBJEKATA KOJI SU GRAĐENI U OVOJ TEHNOLOGIJI

Tako su nastale kamene palate u Persatu i drugim primorskim mjestima koje i danas izazivaju divljenje kod svakog posjetioca ovih naših dragulja uz obalu Jadranskog mora. Na slikama 1,2,3 su prikazani objekti koji su građeni od kamena, uz primjenu opisane tehnologije u Perastu.

walls were exposed to rain for a year, because the stone blocks carved from the calcium-carbonate rocks were bonded to form the whole.

Meanwhile naturally dried wood for the roof construction of the building was left soaked into the sea. In this way all the insects in the wood were destroyed and the wooden construction was permanently protected from their effect. Afterwards the wooden construction had to be dried well in appropriate conditions, and then the covering of the roof could start.

After rough works the artisan works were performed in traditional way: rendering, cabinet making, floor making, fence making and other artisan works.

3 PRESENTATION OF THE BUILDINGS CONSTRUCTED USING THIS TECHNOLOGY

The stone palaces in Perast and other seaside places, which even today arouse admiration in visitors of the Adriatic Sea coast, were built in this way. The buildings made of stone using the described technology in Perast were shown in Figures 1, 2 and 3.



Slika3. Prikaz objekata i palata koji su izgrađeni uz korištenje starog tehnološkog procesa
Figure 3 Presentation of the buildings and palaces built using old technological process

4 PREDLOG ORIGINALNE TEHNOLOGIJE GRAĐENJA

4.1 Opis predložene tehnologije građenja

Opisana drevna tehnologija građenja se teško može realizovati u današnjim uslovima zbog velikog učešća fizičkog rada i neekonomičnosti procesa eksploatacije, obrade i građenja. U periodu u kojem se veoma brzo razvija oprema, mehanizacija i tehnologija, evidentan je nedostatak zanatskih majstora za ručnu obradu kamena, tako da bi bilo neracionalno eksploatisati, ručno obrađivati kamen i graditi objekte kao u drevna vremena. Zato predlažemo tehnologiju građenja koja će sadržati stare alate za završnu obradu, a za eksploataciju, montažu i pripremu blokova koristiti savremene alate, mehanizaciju i opremu. Osnovna karakteristika predložene tehnologije građenja je ubrzan proces izgradnje, uz zadržavanje kvaliteta izvedenih radova i ljepote kamenih fasada i enterijera. Ovim tehnološkim procesom treba postići da obrađeni kamen posle završenog ciklusa obrade izgleda kao da je to rađeno u drevna vremena i da izvedeni objekti imaju patinu starih fasada i enterijera u kojima je osnovni materijal kamen.

4.2 Analiza tehnološkog procesa savremenih tehnologija građenja

Na slici 4. je prikazan tehnološki proces realizacije predložene tehnologije građenja. Za eksploataciju kamena u majdanima je predložena tehnologija bez miniranja, to jest vađenje željenih blokova kamena procesom cijepanja. Ovaj proces eksploatacije je u suštini isti kao i u davna vremena, osim što se vađenje rupa ne odvija ručno ćuskijama, već specijalnim opremom i alatima za izvođenje bušotina, a cijepanje blokova se ne vrši klinovima i maljevima, već specijalnim hidrauličkim klinovima, ili uz korišćenje druge opreme za ovu namjenu, pošto će izbor opreme zavistiti od karakteristika samog nalazišta kamena.

Transport do mjesta obrade se odvija kranom ili drugom mehanizacijom koja je najprikladnija za date uslove, a gruba obrada u kamene blokove vrši se gaterima i frezama za rezanje kamena, te drugim savremenim alatima koji služe za grubo skidanje i obradu površina kamena.

Fina obrada kamenih blokova se obavlja istim alatima (materelini, cokade, škvadar, razne vrste glijeta) I na isti način kao u to drevno vrijeme, jer finalno obrađeni kamen mora tako da izgleda kao da je ručno obrađen, sa patinom starih fasada, bez vidnog učešća mehanizovanog rada. Zbog nedostatka majstora za klesarske radove, predloženo je da se u sklopu tehnološkog procesa organizuje škola za edukaciju mladih zanatlija, koja bi omogućila postizanje kvalitetne finalne ručne obrade i montažu i zidanje sa elementima od kamena, odnosno to bi predstavljalo ključnu aktivnost u tehnološkom procesu.

Transport blokova i elemenata od kamena nije precizno određen jer zavisi od lokacije na kojoj se izvodi objekat i mjesta majdana u kojem se vrši eksploatacija i obrada kamena, odnosno od ekonomske analize opravdanosti određene vrste transporta.

4 PROPOSITION OF THE ORIGINAL CONSTRUCTION TECHNOLOGY WITH THE POSSIBILITY OF ITS USAGE IN PRACTICE

4.1. Description of the proposed construction technology

The described ancient construction technology can hardly be carried out in today's conditions because of great physical work and uneconomic exploitation process, dressing and construction. In the era when the equipment is rapidly developed, as well as the mechanization and technology, it is evident the lack of craftsmen for manual stone dressing, so it would be irrational to exploit, manually dress and construct buildings as it was in ancient times. Therefore we propose the construction technology which will use old tools for final dressing and modern tools, mechanization and equipment for exploitation, assemblage and preparation of the blocks. The basic characteristic of the proposed construction technology is the accelerated construction process, keeping the quality of works and beauty of stone frontages and interior. Using this technological process, the dressed stone, after dressing, should look like it was made in ancient times and the constructed buildings should have the patina of the old frontages and interiors, when stone was used as a basic material.

4.2 Analysis of the technological process of the new construction technology

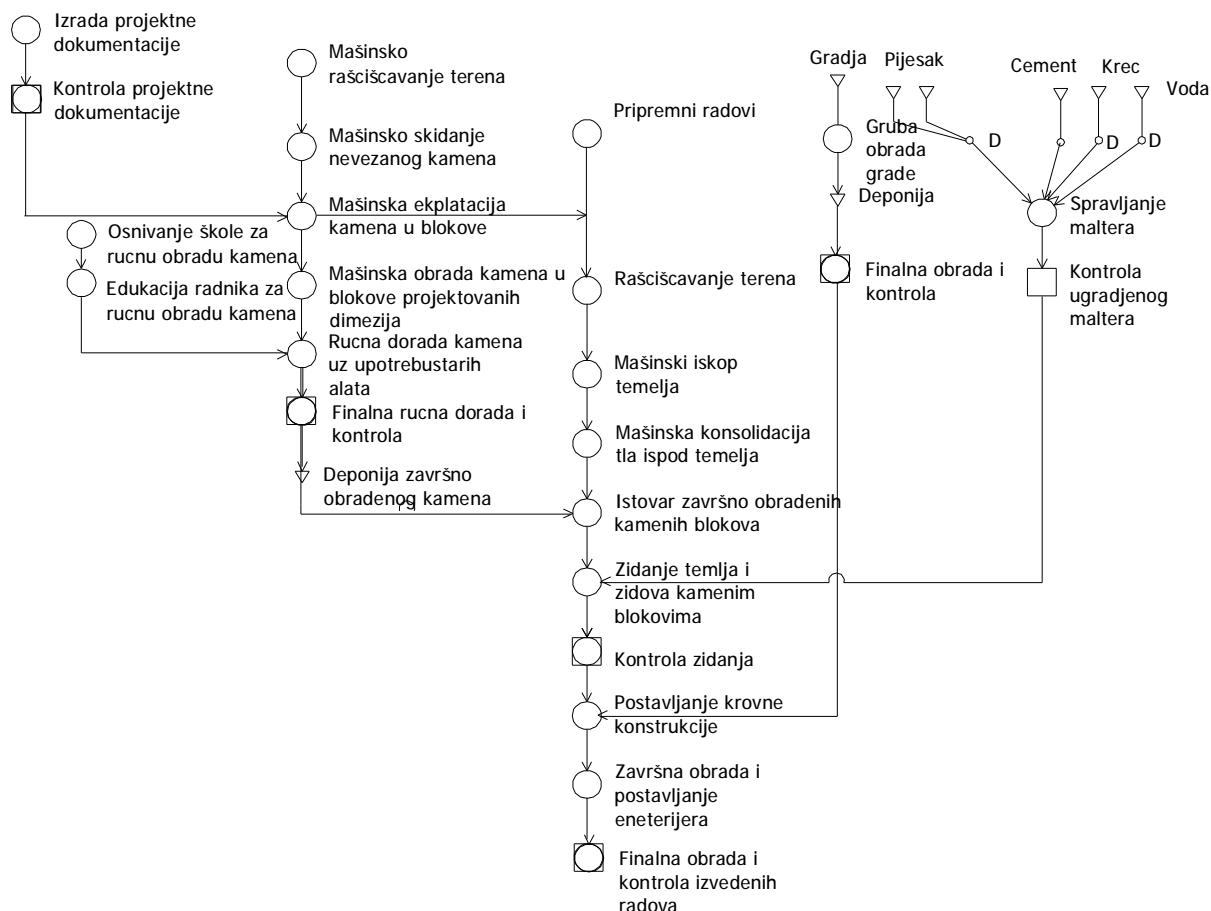
In Figure 4 the technological process of the realization of the proposed construction technology is shown. For stone exploitation of the quarries it was proposed the non-mining technology, i.e. extraction of desired stone blocks by splitting. This exploitation process is basically the same as it was in ancient times, apart from the fact that the hole excavation is not done manually with bars, but with special equipment and tools for bore holes, and block splitting is not performed with wedges and beetles, but with special hydraulic wedges, or using other equipment for this purpose, since the equipment choice depends on the characteristics of the quarry itself.

The transport to the dressing site is performed by building crane or other mechanization which is the most appropriate for actual conditions, while rough dressing of stone blocks is performed using mills and power saws for cutting of the stone, and then using other modern tools for rough removal and dressing of the stone surface.

Fine dressing of stone blocks is done using the same tools (stone hammers, "cokada", square, different types of chisels), the same way as in ancient times, because the dressed stone has to look like manually dressed, with the patina of the old frontages, without obvious mechanized work. Because of the lack of masons, it is suggested the organization of the school for education of young artisans, which would enable to obtain quality manual dressing, as well as the assemblage and masonry with stone elements i.e. it would represent the key activity in technological process.

The transport of the blocks and stone elements is not precisely specified, because it depends on the construction site of the building and quarry, where the exploitation and stone dressing are done, i.e. it depends on the economic analysis of the justification of particular transport mode.

KARTA PROCESA ZA NOVI TEHNOLOŠKI PROCES



Slika 4. Prikaz tehnološkog procesa kod predložene nove tehnologije izgradnje
Figure 4 Presentation of the technological process of the new proposed construction technology

Kod izgradnje objekata zidanje i montaža kamenih elemenata se planira uz korišćenje savremene mehanizacije i tradicionalnih materijala i alata, a sve u funkciji ostvarivanja željenog izgleda izvedenih radova. Predviđena je montaža sa točkova ili sa broda i skladištanje materijala na deponiju, što će zavisiti od uslova na gradilištu. Izbor tipa montaže će se definisati posebnim projektom plana montaže, koji će zavisiti od uslova na gradilištu, dinamike izvođenja radova i karakteristika samog gradilišta na kojem se izvodi predmetni objekat. Prije montaže elemenata neophodno je na licu mjesta iskontrolisati da li je svaki kameni detalj i element urađen prema projektnoj dokumentaciji i da li je došlo do oštećenja prilikom transporta. Posle izvršene kontrole obrađenih elemenata od kamena, vrši se njihova montaža prema urađenom projektu montaže i dinamičkom planu izgradnje objekta. Neophodne dorade i obrade kamena na licu mjesta se izvode na klasičan način i uz korišćenje pomenutih starih alata. Spojevi montažnih elemenata se izvode sa savremenim materijalima, ali uz završnu ručnu obradu i korišćenje starih materijala.

Preporuka je da se krovna konstrukcija, koja nije vidna, izvede uz korišćenje savremenih tehnoloških procesa (izbor kvalitetne građe, sušenje u sušarama, kvali-

In the construction of a building, for masonry and assemblage of stone elements it is planned to use modern mechanization and traditional materials and tools, in order to obtain the desired result of the work. It is planned the assemblage from the wheels or ships and storage of the material at the waste disposal site, which will depend on the conditions at the construction site. The right choice of the assemblage type will be defined by special assemblage project, which will depend on the conditions at the construction site, dynamics of the works and characteristics of the construction site itself where the building is constructed. Before the assemblage of the elements it is necessary to control on the spot if each stone detail and element is done according to the project documentation and whether there were damages during transportation. After the control of dressed stone elements, their assemblage is done according to the assemblage project and dynamics plan of the building construction. The necessary refinement and stone dressing on the spot are done in classical way using mentioned old tools. The assemblage elements are joined using modern materials, but with final manual dressing and using old

tetno impregniranje i završna obrada i montaža). Materijal za pokrivanje krova je crijep, zatim keramika, bakar i drugo, slično kao nekada.

4.3 Osnovni elementi informacionog sistema za proizvodnju kamena, nadgledanje i građenje

Kompletan proizvodni proces je podržan adekvatnim informacionim sistemom koji prati sve faze radova, od projektovanja, eksploatacije kamena, do izgradnje objekta (urađeni projekat u predloženoj tehnologiji predviđa da svaki kameni element ili kamena plastika imaju precizne dimenzije, na osnovu kojih se vrši eksploatacija i obrada, i dalje transport i montaža). Kompletan proces se planira, realizuje i kontroliše na osnovu urađenog informacionog sistema, kao logističke podrške boljoj implementaciji predložene tehnologije u praksi. Ovaj informacioni sistem treba da omogući da se u svakom trenutku zna koji se kameni elementi obrađuju, u kojoj su fazi izvođački radovi, kada će se kompletirati određena faza radova i ko je odgovoran za njihovu realizaciju, odnosno kada će se završiti kompletni radovi. Prednost takvog informacionog sistema je i mogućnost sveobuhvatnog planiranja, realizacije, kontrole po parametrima vremena izvođenja akativnosti, definisanja odgovornosti, kvaliteta izvedenih radova i utroška finansijskih sredstava. Ukoliko se desi da neki od obrađenih elemenata nije kvalitetno urađen, preko informacionog sistema se automatski dostavlja zahtjev za njegovu doradu, uz definisanje parametara koji su neophodni da bi element imao potreban oblik, formiui traženi kvalitet. Informacioni sistem treba da omogući konstantnu komunikaciju između projektanta i obrađivača kamenih elemenata koji se proizvode na licu mjesta, zbog eventualnih izmjena u projektnom rješenju, ili zbog nemogućnosti obrade određenih projektovanih detalja. On takođe treba da omogući usklađenost transporta elemenata i montaže na samom gradilištu, pogotovo kada se planira montaža sa transportnog sredstva. Ovdje je jako interesantna primjena softvera koji omogućavaju praćenje realizacije u četiri dimenzije, gdje se vizuelno, uz korištenje kamera, prati realizacija obrade kamena na licu mjesta i izvođenje radova na gradilištu, dok se sa druge strane takođe prati realizacija izgradnje objekta prema utvrđenoj dinamici. Ovi softverski paketi još omogućavaju da se na osnovu planirane dinamike i unosa izvršenih pozicija radova na računaru dobije vizuelni prikaz urađenih pozicija, što je jako značajno za koordinaciju, informisanost i donošenje adekvatnih upravljačkih odluka.

4.4 Analiza mogućnosti korišćenja ovih tehnologija

Da bi se predložena tehnologija građenja mogla uspješno primijeniti u praksi i da bi se objekti kvalitetno, brzo i ekonomično izvodili neophodno je obezbijediti radnu snagu za ručnu obradu i doradu kamenih ele-

materials as well.

It is recommended that the roof construction, which is not visible, should be done using modern technological processes (quality material, drying in ash-dryers, quality impregnation and final dressing and assemblage). The material for roof covering is tile, then hollow tile, copper and others, similar to what it was used before.

4.3 Proposition of basic elements of the information system for stone production monitoring and construction

The complete production process is supported by adequate information system which follows all the phases of works, from projecting and stone exploitation to building construction (the project in proposed technology predicts precise dimensions of each stone element or marble, on the basis of which the exploitation and dressing are done, as well as the transport and assemblage). The whole process is planned, realized and controlled by the information system as a logistic support to better implementation of the proposed technology in practice. This information system should provide in each moment the information about the stone elements which are dressed, the work phases, the completion time of certain work phase and information about the person responsible for its realization, i.e. to inform when the whole work is going to be finished. The advantage of such information system is the possibility of entire planning, realization, control according to time parameters of the activity, responsibility definition, quality of works and financial expenses. If one of the dressed elements is not of good quality, the demand for its further dressing is presented automatically through the information system, with the definition of parameters necessary to give to the element necessary shape, form and demanded quality. The information system should enable constant communication between planner and processor of stone elements produced on the spot, because of possible changes in the project, or because of the impossibility of dressing of certain projected details. It should also enable the coordination between the transport of the elements and assemblage at the construction site, especially when the assemblage from the means of transport is planned. It is very interesting the software application which enables to follow the realization in four dimensions. The realization of stone dressing on the spot and works at the construction site can be followed visually, with cameras, while on the other side it can also be followed the realization of the construction of the building according to determined dynamics. These software packages also enable visual presentation of the positions on the basis of planned dynamics and entry of performed work positions to the computer, which is very important for coordination, information and adequate management decisions.

4.4 Analysis of the possibility of usage of this original technology in practice

In order to apply successfully in practice the proposed construction technology and to construct quality buildings, rapidly and economically, it is necessary to provide the labour for manual dressing and

menata, prema već urađenom projektnom rješenju. Kako zanati, kao što su ručna obrada kamena, polako izumiru i kako je sve manje majstora koji mogu kvalitetno da izvode ovu vrstu radova, ili iako ih ima, obično nemaju kompletan alat koji je neophodan za obradu, veoma je teško organizovati kvalitetno izvođenje ovakve vrste radova. Stoga je predloženo osnivanje škole za edukaciju majstora za ručnu obradu kamena, koja bi bila sastavni dio tehnološkog procesa, što bi omogućilo bolju i kvalitetniju obradu. Povoljna okolnost je što je ovaj tip zanatlija deficitaran pa je za organizaciju ovakvih škola moguće naći finansijska sredstva i pomoć. Stvaranjem dobrih majstora za obradu kamenih elemenata imali bismo dobru osnovu za implementaciju predložene tehnologije građenja u praksi i izgranjju objekata sa velepnim kamenim fasadama.

5 ZAKLJUČAK

Prelijepe kamene fasade, detalji kamene plastike i uklopljenost u pejzaž objekata od kamena u Perastu i drugim mjestima uz crnogorsku obalu proizvode utisak kao da su iznikle iz kamena i Bokokotorskog zaliva. Stoga smo ovim radom željeli da izanaliziramo mogućnost izgranjje ovakvih i sličnih objekata i danas, ali na savremeniji način, uz korišćenja savremenih tehnologija, mašina, alata i informacionih sistema [1], [2], [3], [5].

Analizirani tehnološki proces nam omogućava da obrađeni kamen u završnoj fazi izgleda kao da je sve ručno rađeno, kao nekad, zbog čega je i predloženo korišćenje istih alata za finalnu obradu. Da bi se ova faza radova realizovala, predloženo je da se u sklopu tog tehnološkog procesa organizuje manja škola za edukaciju zanatskih majstora, pogotovo mlađe populacije [4], [6], [7].

Mišljenja smo da je organizacija jednog ovakvog tehnološkog procesa u praksi veoma interesantna, jer raste zainteresovanost investitora za gradnju ovakve vrste objekata, pogotovo u priobalnom području.

Dosadašnja praksa kod nas je pokazala da iako ima investitora koji žele da izgrade objekte od kamena kao osnovnog materijala, oni teško mogu naći organizovanu kompaniju koja može kvalitetno izvesti ove radove i sve se, uglavnom, završava na improvizacijama, i pored dugog perioda izgradnje i velike cijene koštanja radova. Često se, pak, pristupa oblaganju već postojećih elemenata konstrukcije, što je u suštini samo imitacija. Ukoliko predložena tehnologija dobija na značaju, jer rješava ove probleme iz prakse i veoma je interesantna za materijalizaciju, jer investitorima koji žele gradnju objekata uz korišćenje kamena kao osnovnog materijala, omogućava bržu i ekonomičniju gradnju. Predložena tehnologija je posebno interesantna za područje Jadrana i šire gdje se povećao obim građenja, a u okruženju postoji veliki broj potencijalnih majdana za eksploataciju kamena.

Ova tehnologija takođe podržava gradnju objekata uz korišćenje prirodnih materijala i uz minimalni negativni uticaj na životnu sredinu, o čemu će se u budućnosti morati voditi računa.

refinement of stone elements, according to already presented project solution. Since trades, such as manual stone dressing, slowly vanish, and since there are less craftsmen which can do this type of work well, or even if they exist, they usually do not have the necessary tools for dressing, it is very difficult to organize quality works. The activity of manual stone dressing using ancient tools in suggested technological process represents the key activity. The quality of the construction of buildings in proposed new construction technology mostly depends on the quality of work. Therefore the foundation of the school for education of craftsmen for manual stone dressing was suggested, which would enable better and more quality dressing. The favourable circumstance is that there are not much of these artisans, so it is possible to find the financial means and help for the organization of these schools. The education of good craftsmen for stone dressing would be a good basis for the implementation of this original building technology in practice and construction of the buildings with monumental stone frontages.

5 CONCLUSION

Beautiful stone frontages, marble details and insertion into the landscape of the stone buildings in Perast and other places on the Montenegrin coast give the impression that they came out of the stone of the Bay of Boka Kotorska. Therefore in this paper it was presented the analysis of the possibility for construction of these and similar buildings even today, but in more modern way, using modern technologies, machines, tools and information systems [1], [2], [3], [5].

The analyzed technological process enables dressed stone to look as it was done manually, as in past times, and as a result the same tools for final dressing are proposed for usage. In order to realize this phase of work, in the context of this technological process it was suggested the organization of a small school for education of craftsmen, especially younger population [4], [6], [7].

We think that the organization of such technological process in practice is very interesting, because the investors are more and more interested in the construction of the buildings of this type, especially in the littoral area.

Previous practice in our country demonstrated that, although there are investors who want to construct buildings of stone as basic material, they can hardly find organized company which can do quality works of this type, almost every attempt is improvisation, regardless the long period of construction and high prices of works. However, it is often done the covering of already existent construction elements, which is basically only imitation. The proposed technology is particularly interesting for the area of the Adriatic Sea and widely, where the construction has grown, and in the surroundings there is great number of potential quarries for stone exploitation.

This technology also supports the construction of buildings using natural materials with minimum negative influence on the environment, which should be taken care of in the future.

6 LITERATURA REFERENCES

- [1] Ahuja. H.N., Project Management: Techniques in Planning and Controlling Construction Project, New York, 1994.
- [2] Archibald.A.B. Managing High-Technology Programs and Projects, New York, 1992.
- [3] Frederick E. Gould- Nancy E. Joyce, Construction Project Management, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, Columbus, Ohio, 2001.
- [4] Ignjatović, S Marinković, Projektovanje betonskih konstrukcija prema upotrebnom veku, deo 2 - proračunski dokazi za različite deteriorizacije mehanizme, Časopis, Materijali i konstrukcije, vol. 51, br. 1, str. 3-17, 2008.
- [5] M. Knežević, R. Zejak, Neuronske mreže - primjena za izradu prognoznog modela eksperimentalnog istraživanja za vitke armirano-betonske stubove, Časopis, Materijali i konstrukcije, vol. 51, br. 1, str. 41-56, 2008.
- [6] M.Stanković, S. Stanković, Stanovanje sutrašnjice - pasivni standar, Časopis, Materijali i konstrukcije, vol. 51, br. 4, str. 27-41, 2008.
- [7] Thomas Bateman, Scott Snell: Management – Building Competitive Advantage, New York, 1999.

REZIME

ZABORAVLJENE TEHNOLOGIJE GRAĐENJA

Ratko MITROVIĆ

Na početku ovog rada prezentiraćemo tehnologije građenja koje su se koristile u periodu prije dvadesetog vijeka za gradnju luksuznih vila i palata, a u međuvremenu su u potpunosti izumrle. Ova tehnologija je kao osnovni materijal koristila sedimentne krečnjačke stijene, koji su obrađivani u kamene blokove željenog oblika i forme. Vađenje kamena iz stijenskog masiva je bilo ručno i uz primjenu drevnih metoda za eksploataciju kamena. Obrada kamena je takođe bila ručna, uz korišćenje veoma starih alata i metoda za obradu kamena i izradu umjetničkih detalja. Transport obrađenih kamenih elemenata je vršen brodovima, a na mjestu gradnje je rađena samo montaža već završno obrađenih blokova. Da bi se ova tehnologija realizovala neophodno je bilo uraditi projektnu dokumentaciju, gdje su se za vaki kameni blok morale dati precizne dimenzije i forma, jer se obrada obavljala u majdanu na stotine kilometara udaljenom od mjesta montaže. Ova drevna tehnologija izgradnje predivnih palata i drugih reprezentativnih objekata na prostorima Sredozemlja, koja se više ne koristi, je preteča najsavremenijih industrijskih tehnologija građenja, gdje se gotovi elementi proizvode u fabrikama, a na gradilištu se vrši samo montaža. Ovaj rad ima za cilj da podsjeti na te zaboravljene tehnologije, uz savremeniji pristup eksploataciji i montaži obrađenih kamenih blokova, a zadržavanju korišćenja starih alata i ručne završne obrade. Na osnovu analize starih i najsavremenijih tehnologija predložićemo novu originalnu tehnologiju građenja objekata sa kamenim fasadama, kod kojih se elementi od kamena koriste kao osnovni materijal. Ta tehnologija će zadržati ljepotu starih kamenih fasada uz tradicionalnu finalnu obradu kamenih blokova, ali će, sa druge strane, omogućiti efikasnije i ekonomičnije građenje, pa tako biti konkurentna na tržištu.

Ključne riječi: stare tehnologije, kamen, tehnološki proces, informacioni sistem

SUMMARY

FORGOTTEN CONSTRUCTION TECHNOLOGIES

Ratko MITROVIĆ

At the beginning of this paper there will be presented the technologies used during the 20th century for the construction of luxury villas and palaces, which have completely disappeared. These technologies used limestone sedimentary rocks, split into stone blocks of desired form and shape, as a basic material. Stone extraction from the rock massif was done manually using ancient methods for stone exploitation. Stone dressing was manual as well, performed using very old tools and methods for stone dressing and artistic details production. Dressed stone elements were transported by ships and at the construction site only the assemblage of dressed blocks was done. In order to realize this technology it was necessary to prepare the project documentation, where for each stone block should have been presented the precise dimensions and form, because dressing was done in the quarry hundred kilometers far from the place of assemblage. This ancient construction technology of beautiful palaces and other representative buildings in the Mediterranean, which is not used any more, is the antecedent of the most modern industrial construction technologies, where the finished elements are produced in factories and only assemblage is performed at the location site. The aim of this paper is to remind of the forgotten technologies, with more modern approach to the exploitation and assemblage of dressed stone blocks and with the usage of old tools and manual final dressing. On the basis of the analysis of old and the most modern technologies we will suggest the new, original construction technology for buildings with stone frontage, where the stone elements are used as a basic material. This technology will keep the beauty of the old stone frontages with traditional final dressing of the stone blocks, but, on the other hand, it will enable more efficient and economic construction, therefore it will be competitive at the market.

Ključne riječi: old technologies, stone, technological process, information system

POUZDANOST AB MONTAŽNIH VEZA

RELIABILITY OF RC PRECAST JOINT

Damir ZENUNOVIĆ
Radomir FOLIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 624.014.7.046:519.213 = 861

1 UVOD

Osnovna funkcija građevinskog inženjstva je adekvatno rješenje prihvatanja i provođenja sila kroz sistem (konstrukciju). U tu svrhu se vrši analiza, koja predstavlja idealizaciju konstrukcije u smislu jednostavnijeg, ali logičnog matematičkog rješenja, koje sadrži osnovne elemente stvarne konstrukcije. Kod tradicionalnog pristupa analizi, dejstva na konstrukciju su modelirana kao potpuno definisani, jednostavni geometrijski ili analitički izrazi. Isto tako svojstva materijala su usvojena kao nepromjenljiva unutar konstrukcije i u vremenu. Naravno, dejstva na građevinske konstrukcije nisu nikada u potpunosti poznata u smislu njihovog intenziteta i učestalosti pojave. Usvojene proračunske veličine dejstva su slučajne i svaka konstrukcija može biti izložena dejstvu većeg intenziteta od projektovanog. Savremeni pristup uspostavljanja zavisnosti promjenljivih ulaznih veličina i izlaznih veličina primjenom vještačkih neuronskih mreža prezentiran je u radu [25]. Ovakav pristup je pokazao zadovoljavajuću preciznost u slučajevima kada postoji dovoljan broj izmjerenih eksperimentalnih podataka.

Svi građevinski materijali sadrže mikrokristalne imperfekcije ili lokalne nedostatke. Može se reći da je svaki materijal zbir raznih defekata i za upotrebu se smatra prihvatljivim ako je zbir defekata predvidljiv. Ne postoje, ni do danas, razvijene teorije koje uspostavljaju odnose između čvrstoće i deformacije tijela. Takođe, ne postoje uokvirena istraživanja fenomena kao što su: plastično tečenje i krti lom metala, zamor i puzanje, elastični i postelastični odgovor i sl.

Damir Zenunović, Docent Univerziteta u Tuzli
Fakultet za rudarstvo, geodeziju i građevinarstvo, Tuzla
[e-mail: damir.zenunovic@untz.ba](mailto:damir.zenunovic@untz.ba)
Radomir Folić, Profesor, Departman za građevinarstvo
Fakultet tehničkih nauka Novi Sad
[e-mail: folic@uns.ac.rs](mailto:folic@uns.ac.rs)

1 INTRODUCTION

The basic function of building design is adequate acceptance and implementation of loads through the system (construction). For this purpose performs the analysis, which represent of structures idealization in terms of simpler, but the logical mathematical solution, which contains the basic elements of the real structures. With the traditional approach to the analysis, the actions on the structure are modeled as fully defined, simple geometrical or analytical expressions. Also, material properties are adopted as fixed within the structure in time. Of course, the actions on civil structures have never fully known in terms of their intensity and frequency of occurrence. Adopted design values of the actions are random, and each structure can be exposed to the actions with greater values than design values. Modern approach to establishing the dependence of variable input and output values using artificial neural networks is presented in the paper [25]. This approach has proved sufficiently precise in cases where a sufficient number of measured experimental data.

All building materials contain microcrystalline imperfections or local defects. It can be said that each material is sum of various defects and for the use is considered acceptable if the sum of defects are predictable.

Not today, developed theories that relate the strength and deformation of the body not exist. Also, there are no framed research of phenomena such as plastic creep and brittle fracture, fatigue, and elastic and post-elastic response etc.

Damir Zenunović, Assistant Professor, Tuzla University,
Faculty of Mining, Geology and Civil Engineering Tuzla,
[e-mail: damir.zenunovic@untz.ba](mailto:damir.zenunovic@untz.ba)
Radomir Folić, Professor, Civil Engineering Department,
Faculty of Technical Sciences Novi Sad,
[e-mail: folic@uns.ac.rs](mailto:folic@uns.ac.rs)

Načini na koje dolazi do otkaza građevinskih konstrukcija, njihova učestalost, ekonomske i socijalne posljedice, pokazuju priličnu razliku između hipotetičkih i realnih konstrukcija. Proračunsko opterećenje, uslovi na gradilištu, svojstva materijala, razvijene proračunske procedure i adekvatnost predviđenih veličina i oblika konstrukcije i njenih elemenata je ponekad daleko od stvarnih parametara. Navedeni parametri su rezultat kompleksnih međusobnih odnosa, defekata materijala, strukturalnih odstupanja, ljudskih grešaka, i imaju karakter slučajno promjenljivih. Stoga je za kvantifikaciju sposobnosti konstrukcije da ispuni očekivane zahtjeve neophodno određivanje mjere uspješnosti, koja se naziva **pouzdanost**.

Uobičajena definicija pouzdanosti je:

Pouzdanost je vjerovatnoća da će objekat (sistem) adekvatno ispuniti njegovu zahtijevanu funkciju, u definisanom vremenskom periodu, pod određenim okolnostima.

Prvi korak u ocjenama konstrukcije korištenjem teorije pouzdanosti jeste pribavljanje svih neophodnih ulaznih podataka koji opisuju konstrukciju. Analiza pouzdanosti započinje sa identifikacijom različitih izvora rizika na konstrukciji. U radu [21] prezentirano je stablo slučaja, koje razmatra sve moguće uzročnike otkaza elementa i podsistema koji vodi otkazu sistema. Za svku komponentu u stablu slučaja mora se definisati granično stanje. Analiza pouzdanosti uključuje proračun i predviđanje vjerovatnoće narušavanja graničnog stanja u bilo kojem trenutku eksploatacionog vijeka konstrukcije. Vjerovatnoća pojave događaja kao što je narušavanje graničnog stanja je numerička vrijednost mogućnosti pojave. Iz jednačine graničnog stanja može se za svki parametar proračunati vjerovatnoća otkaza p_f i indeks sigurnosti b . Kada se odredi vjerovatnoća, slijedeći korak je odabir alternative proračuna koja poboljšava pouzdanost konstrukcije, a minimizira rizik od otkaza. Pri tome je odgovarajuće opažanje nepouzdanosti ključno za sigurnost i efikasnu odluku. Probabilistička proračunska procedura je analiza konstrukcije koja uzima u obzir informacije probabilističkog karaktera o kapacitetu i zahtjevima. Ovakav pristup uslovljava sveobuhvatnu analizu konstrukcije sa svrhom optimaliziranja zahtjeva sigurnosti i ekonomičnosti.

Koncept pouzdanosti je danas opšte prihvaćen za projektovanje konstrukcija, iako je dobro poznato da je često potrebno značajno pojednostavljenje proračunskog problema da bi se ovaj koncept efikasno primijenio. Ovo je prije svega iz slijedeća dva razloga:

(1) U svojoj najjednostavnijoj formulaciji procedure zasnovane na pouzdanosti zahtjevu prikaz performansi konstrukcije u eksplicitnim relacijama između varijabli (promjenljivih) dejstava i otpornosti. Ali kada je ponašanje konstrukcije uslovljeno nelinearnostima više varijabli, kao što je uvijek slučaj sa betonom, ovakve relacije općenito su dostupne samo u implicitnom obliku.

(2) Kod konstruktivnih sistema sa više komponenti, potpuna analiza pouzdanosti podrazumjeva analizu pouzdanosti dijelova sistema i sistema. Zavisno od broja i rasporeda dijelova ocjena pouzdanosti sistema može postati vrlo komplikovana pa čak i praktično nemoguća za velike konstruktivne sisteme.

Ways to come to the failure of civil structures, their frequency, economic and social consequences, show a reasonable difference between the hypothetical and real structures. Design actions, site conditions, material properties, developed design procedures and the adequacy of the anticipated size and form of structures, and its elements, are sometime far from the real parameters. The mentioned parameters are the result of complex mutual relations, material defects, structural differences, human errors, and have the character of random variable. Therefore, for the quantification of structural capacity to meet expected requirements it is necessary to define measures of success, which is called **reliability**.

The usual definition of reliability is:

Reliability is the probability that the building (system) is adequate to meet its desired function in the defined time period, under certain circumstances.

The first step in reliability-based assessment is to acquire all necessary input data describing the structure. The reliability analysis starts with the identification of the different sources of risk of the structure. In the paper [21] is presented fault tree, which regards all possible causal sequences of component and subsystem failures that lead to system failure. For all components in a fault tree a limit-state has to be defined. Reliability analysis includes the calculation and prediction of the probability of limit-state violation at any stage during a structure's life. The probability of the occurrence of an event such as a limit-state violation is a numerical measure of the chance of its occurring. From the limit state equation can be calculated for each parameter probability of failure p_f and safety index b . When the probability determined, the next goal is to choose design alternatives that improve structural reliability and minimize the risk of failure. Where appropriate perceptions of uncertainty are essential for safe and efficient decisions. Probabilistic design procedures is the analysis of structures which take into account probabilistic-based information about capacities and demands. This provides a comprehensive analysis of structures with the aim of optimizing the requirements of safety and economy.

Reliability-based concepts are nowadays widely accepted in structural design, even if it is well known that, before such concepts can be effectively implemented, the actual design problem often needs to be considerably simplified. This is mainly due to the two following reasons:

(1) In their simplest formulation, reliability-based procedures require the structural performance to be represented by explicit functional relationships among the load and the resistance variables. But, unfortunately, when the structural behavior is affected by several sources of non-linearity, as always happens for concrete structures, such relationships are generally available only in an implicit form.

(2) For structural systems with several components, a complete reliability analysis includes both component-level and system-level estimates. Depending on the number and on the arrangement of the components, system reliability evaluations can become very complicated and even practically impossible for large structural systems.

2 OSNOVE TEORIJE VJEROVATNOĆE I MJERODAVNI STATISTIČKI PARAMETRI

Vjerovatnoća određenog događaja u trenutku vremena T se definiše izrazom:

$$P(T \leq t) = F(t); \quad t \geq 0 \quad (1)$$

Vrijednost vjerovatnoće može biti u granicama $0 \leq P(A) \leq 1$. Prema tome, sigurnost se može definisati kao $P[C] = 1,0$. Isto tako mora vrijediti jednakost:

$$P[\text{success} + \text{failure}] = 1 \Rightarrow P[\text{success}] + P[\text{failure}] = 1 \quad (2)$$

Vjerovatnoća uspješnosti konstrukcije je njena pouzdanost i može se definisati izrazom:

$$R + P(f) = 1 \quad (3)$$

Uvrštavanjem (1) u (3) dobije se funkcija pouzdanosti:

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) \quad (4)$$

F(t) je funkcija raspodjele otkaza, koja pokazuje vjerovatnoću otkaza sistema do trenutka vremena t. F(t) se još zove kumulativna funkcija raspodjele. Derivacijom funkcije raspodjele otkaza dobije se funkcija gustine otkaza,

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (5)$$

Prema tome izraz (4) dobija oblik:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (6)$$

Promjena intenziteta otkaza u eksploatacionom vijeku sistema (konstrukcije) može se iskazati pomoću funkcije intenziteta otkaza date izrazom [19]:

$$I(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (7)$$

Funkcija pouzdanosti se može izraziti preko funkcije intenziteta otkaza u obliku:

$$R(t) = e^{-\int_0^t I(t) dt} \quad (8)$$

Ključni statistički parametri diskretizovane raspodjele slučajno promjenljivih, očekivana vrijednost i varijacija, definišu se iz analogije krutog štapa opterećenog nizom vertikalnih koncentričnih sila f_i na udaljenostima x_i , kako je pokazano na slici 1.

Iz uslova ravnoteže je poznato da je sila koja uravnotežuje vertikalne sile f_i jednaka

$$M = \sum_{i=1}^n f_i \quad (9)$$

dok se njen položaj određuje izrazom,

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i f_i}{M} \quad (10)$$

Ako se pretpostavi da su diskretne koncentrisane sile sa slike 1 vjerovatnoće mogućih događaja x_1, x_2, \dots, x_n i

2 BASIS OF THE THEORY OF PROBABILITY AND THE RELEVANT STATISTICAL PARAMETERS

The probability of particular events in the moment of time T is defined expression:

$$P(T \leq t) = F(t); \quad t \geq 0 \quad (1)$$

The value of probability can be inside $0 \leq P(A) \leq 1$. Accordingly, security can be defined as $P[C] = 1,0$. Also must be valid equality:

$$P[\text{success} + \text{failure}] = 1 \Rightarrow P[\text{success}] + P[\text{failure}] = 1 \quad (2)$$

The probability of structure success is its reliability and can be defined by expression:

$$R + P(f) = 1 \quad (3)$$

Substituting (1) to (3) obtain the reliability function:

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) \quad (4)$$

F(t) is a function of the failure distribution, which quantify probability of system failure until moment of time t. The function F(t) is also called cumulative distribution function. With derivation of function of failure distribution obtain the function of failure density.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (5)$$

Thus expression (4) gets the form:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (6)$$

Change of failure intensity during system (structure) service life can be expressed using a function of failure intensity expressed as [19]:

$$I(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (7)$$

Reliability function can be expressed through the functions of the failure intensity with form:

$$R(t) = e^{-\int_0^t I(t) dt} \quad (8)$$

Key statistical parameters discrete distribution of random variable, expected value and variation, can be defined by analogy from solid beam loaded with a series of concentric vertical forces f_i at distances x_i , as shown in Fig. 1.

From the condition of equilibrium is well known that the force that balances the vertical forces f_i equal to,

$$M = \sum_{i=1}^n f_i \quad (9)$$

while its position is determined expression,

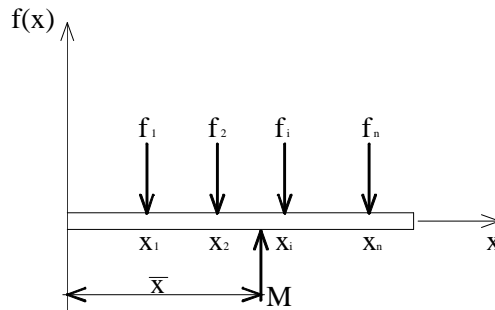
$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i f_i}{M} \quad (10)$$

If we assume that the discrete concentric force (Fig.1) are probability of possible events x_1, x_2, \dots, x_n and

vrijedi jednačina (2) ($M=1$), izraz (9) se može napisati u obliku:

$$E[x] = \bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i f_i \quad (11)$$

equation (2) is valid ($M = 1$), expression (9) can be rewritten in the form:



Sl.1. Koncentrisane sile na krutoj gredi
Fig.1. Concentric forces on solid beam

Mjera varijabilnosti (rasipanja) slučajnih varijabli se definiše takođe iz statike, analogijom sa momentom inercije,

$$I_y = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 f_i \quad (12)$$

Analogy with the moment of inertia can be defined measure of variability (dispersion) of random variables

$$V[x_i] = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 f_i \quad (13)$$

Na osnovu izraza (10) i (11) varijanca se može izraziti kao očekivanje,

$$V[x_i] = E[x_i^2] - (E[x_i])^2 \quad (14)$$

On the basis of expression (10) and (11) the variance can be expressed as an expectation,

Standardna devijacija je: $s[x_i] = \sqrt{V[x_i]}$

Standard deviation is: $s[x_i] = \sqrt{V[x_i]}$

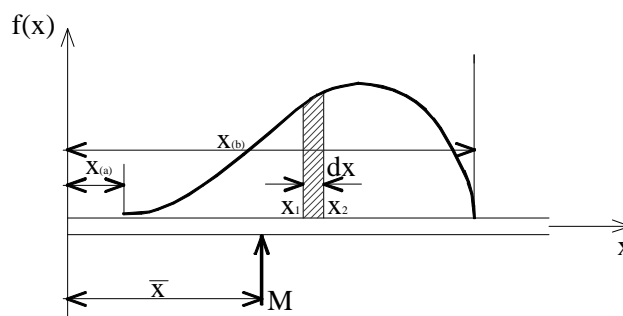
Drugi važan parametar rasipanja rezultata je koeficijent varijacije, koji predstavlja mjeru odstupanja od centralne osi,

Another important parameter of random variables scattering is the coefficient of variation, which is a measure of deviation from the central axis,

$$V(x) = \frac{s(x)}{E(x)} \cdot 100 (\%) \quad (15)$$

Za analizu kontinuirane raspodjele slučajno promjenljive može se primjeniti analogija sa jedankopodijeljenim vertikalnim opterećenjem na krutoj gredi od $x(a)$ do $x(b)$ [14], prikazano na slici 2.

For the analysis of continuous distribution of random variable can be applied analogy with distributed vertical load on solid beam, from $x(a)$ to $x(b)$ [14], presented in Fig.2.



Sl.2 - Jenoliko podijeljeno vertikalno opterećenje na krutoj gredi
Fig.2 - Continuous distribution of vertical load on solid beam

U ovom slučaju, izraz (9) je oblika,

In this case, expression (9) has the form,

$$M = \int_{x(a)}^{x(b)} f(x) dx \quad (16)$$

a izraz (10),

$$\bar{x} = \frac{\int_{x(a)}^{x(b)} xf(x)dx}{M} \quad (17)$$

Površina ispod krive $f(x)$ za interval dx je vjerovatnoća da će vrijednost x biti u intervalu od x_1 do x_2 :

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x)dx = P[x_1 \leq x \leq x_2] \quad (18)$$

Površina ispod krive u intervalu $x(a)$ do $x(b)$ mora biti 1 (jedan).

$$\int_{x(a)}^{x(b)} f(x)dx = 1 \quad (19)$$

Za kontinuiranu raspodjelu očekivana vrijednost je,

$$E[x] = \int_{x(a)}^{x(b)} xf(x)dx \quad (20)$$

a varijanca,

$$V[x] = \int_{x(a)}^{x(b)} (x - \bar{x})^2 f(x)dx \quad (21)$$

and expression (10),

Area under the curve $f(x)$ for interval dx is the probability that the value of x will be in the interval from x_1 to x_2 :

Area under the curve in the interval of $x(a)$ to $x(b)$ must be 1 (one).

For continuous distribution expected value is

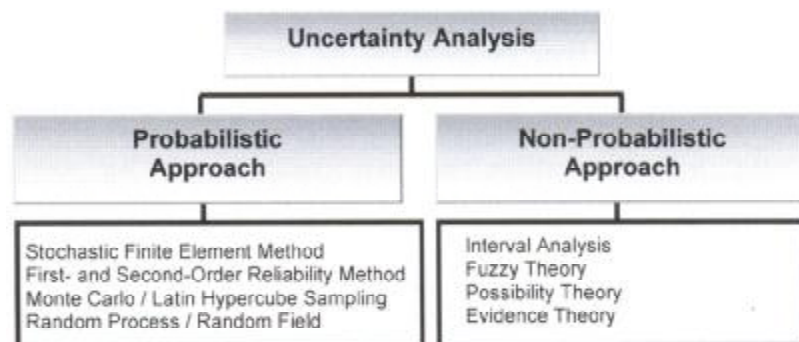
and variance,

3 FUNKCIJA GUSTOĆE VJEROVATNOĆE

Teorija vjerovatnoće razmatra vjerovatnoću određene pojavnosti događaja i kvantificira mjere nesigurnosti slučajnih događaja. Metodologija, kojom se mogu razmotriti slučajnosti ili nesigurnosti u podacima ili modelima, poznata je kao analiza nesigurnosti ili stohastička analiza. Na slici 3 pokazane su razne metode analize nesigurnosti zasnovane na prikazu nesigurnosti.

3 PROBABILITY DENSITY FUNCTION

Probability theory treats the likelihood of a given event's occurrence and quantifies uncertain measures of random events. Methodologies, which can consider the randomness or uncertainty in the data or model, are known as uncertainty analysis or stochastic analysis. Figure 3 shows various methods of uncertainty analysis based on the representation of uncertainties.



Sl.3 - Kategorije analize nepouzdanosti[7]
Fig.3 - Uncertainty Analysis Categories[7]

Probabilistički pristup zasnovan je na teoretskim osnovama funkcije gustoće vjerovatnoće i uvođenju korišćenja slučajno promjenljivih za prikaz nesigurnosti, dok deterministički (ne-probabilistički) pristup koristi neprecizno znanje o stvarnim vrijednostima parametara.

Funkcija gustoće vjerovatnoće reprezentira relativnu učestalost određene realizacije slučajne promjenljive.

The probabilistic approach is based on the theoretical foundation of the probability density function information and introduces the use of random variables to represent uncertainty, while the non-probabilistic approach manages imprecise knowledge about the true value of parameters.

The probability density function represents the

Osnova statističke obrade podataka jeste definisanje zakonitosti (funkcije) raspodjele slučajno promjenljivih. Podaci utvrđeni analizom rezultata eksperimenata imaju određenu zakonitost raspodjele. U postupku analize raspodjela utvrđenih podataka se upoređuje sa poznatim teorijskim zakonitostima raspodjele. Izbor najpovoljnije zakonitosti raspodjele započinje postavljanjem hipoteze o mogućem teorijskom zakonu raspodjele. Ocjena postavljene hipoteze se vrši preko statističkih testova zasnovanih na maksimalno dozvoljenom odstupanju empirijskog i teorijskog zakona raspodjele. Aproksimacija eksperimentima utvrđene raspodjele nekom poznatom teorijskom raspodjelom omogućava korištenje analize poznate teorijske raspodjele, što značajno pojednostavljuje postupak ocjene pouzdanosti sistema (konstrukcije).

Nekoliko kontinuiranih raspodjela igra značajnu ulogu u građevinarstvu. Najvažnije su jednolika, eksponencijalna, gama, beta, Weibull-ova, binomna, lognormalna i normalna raspodjela. Najjednostavniji oblik kontinuirane raspodjele je jednolika sa funkcijom gustoće vjerovatnoće, srednjom vrijednosti i varijancom,

$$f(x) = \frac{1}{b-a}, \quad a \leq x \leq b \quad (22)$$

$$E[x] = \frac{b+a}{2} \quad (23)$$

Kod eksponencijalne raspodjele vjerovatnoća da se neće desiti slučajno promjenljiva X u vremenskom intervalu t je,

$$P(X = 0) = e^{-It} \quad (25)$$

a kumulativna funkcija raspodjele je,

$$P(T \leq t) = F_T(t) = 1 - e^{-It} \quad (26)$$

Ova raspodjela je primjenljiva za elemente koji ne mijenjaju svoje karakteristike u veoma dugom eksploatacionom vijeku. Pogodna je za betonske konstrukcije.

Sa fizikalnog stanovišta, inženjeri i naučnici su ustanovili da empirijske raspodjele mnogih prirodnih procesa i procesa u konstrukciji približno odgovaraju gama raspodjeli. Standardna gama funkcija raspodjele vjerovatnoće može se napisati,

$$f(t) = \begin{cases} \frac{t^{r-1} e^{-t}}{\Gamma(r)} & \text{for } 0 \leq t \text{ and } r > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$

$\Gamma(r)$ je standardna gama funkcija definirana kao,

$\Gamma(r)$ is complete (standard) gamma function defined as

$$\Gamma(r) = \int_0^{\infty} t^{r-1} e^{-t} dt, \quad \text{for } r > 0 \\ = 0 \text{ otherwise} \quad (28)$$

Parametar r je poznat kao parametar oblika.

Beta raspodjela se koristi kod eksperimenata koji se ponavljaju N puta sa odvojenim izlazima za svaki eksperiment, gdje je x broj uspješnih eksperimenata. Modeli sa beta raspodjelom imaju posebnu ulogu kod metoda odlučivanja. Raspodjela slučajno promjenljive koja poprima vrijednosti u određenom intervalu. Beta funkcija raspodjele vjerovatnoće data je izrazom,

relative frequency of certain realization for random variables. The basis of statistical data processing is to define the probability density function. Data determined during analysis of the experiments results have particular laws of distribution. In the process of analysis the distribution of determined data comparisons with known theoretical laws of distribution. Selecting the best laws of distribution begins by setting the hypotheses about the possible theoretical distribution law. Evaluation of set hypothesis is done by statistical tests based on the maximum permitted deviations of the empirical and theoretical laws of distribution. Approximation of the distribution determined by experiments with a known theoretical distribution analysis allows the use of well-known theoretical distribution, which greatly simplifies the process of assessing the reliability of the system (structure).

Several continuous distribution play useful roles in civil engineering. The more important ones are the Uniform, Exponential, Gamma, Beta, Weibull, Binom, Lognormal and Normal distribution.

The simplest type of continuous distribution is the uniform with probability distribution function, mean and variance

$$V[x] = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (24)$$

By exponential distribution the probability of no occurrences of the random variable X during a time interval t is

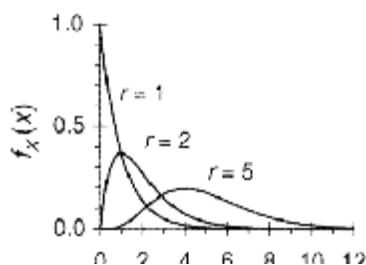
and cumulative distribution function is

This distribution is applicable for elements that do not change their characteristics in a very long period of exploitation. It is suitable for concrete structures.

From the physical viewpoint, engineers and scientists have found that the empirical distributions of many natural and structural processes closely resemble the gamma. The standard gamma probability distribution function is written as

The parameter r is known as the shape parameter.

The beta distribution is used in the experiments repeated N times with independent output for each experiment, where x is the number of successful experiments. The beta distribution models plays a special role in decision methods. The distribution of random variable that takes value in the interval. The beta probability distribution function is given by



Sl.4 - Standardna gamma funkcija gustoće vjerovatnoće [16]
 Fig.4 - Standard gamma probability density functions [16]

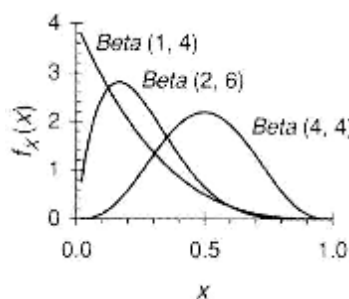
$$f(x|a, b) = \frac{1}{B(a, b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1}, \text{ for } 0 < x < 1, a > 0, b > 0 \quad (29)$$

$$= 0 \text{ otherwise}$$

sa beta funkcijom,

with beta function

$$B(a, b) = \int_0^1 x^{a-1} (1-x)^{b-1} dx \quad (30)$$



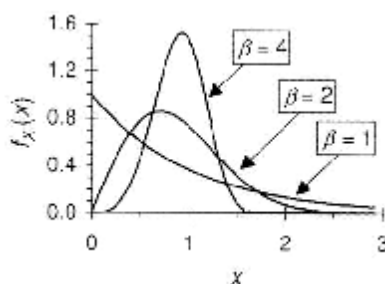
Sl.5 - Standardna beta funkcija gustoće vjerovatnoće [16]
 Fig.5 - Standard beta probability distribution functions [16]

Weibull-ova raspodjela se koristi u praksi za sisteme koji pokazuju porast tendencije ka otkazu u vremenu. Weibull-ova funkcija raspodjele vjerovatnoće data je izrazom,

Weibull distribution is used in practice for systems that show a growing tendency to failure over time. The Weibull probability distribution function is given by

$$f(x) = \frac{b}{I} \left(\frac{x}{I}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{I}\right)^b\right], \text{ for } x > 0, I > 0 \quad (31)$$

$$= 0 \text{ otherwise}$$



Sl.6 - Weibull-ova funkcija gustoće vjerovatnoće [16]
 Fig.6 - Weibull probability distribution functions [16]

Dok se duktilni otkaz armiranobetonskog konstruktivnog elementa dešava simultano duž površine otkaza, okarakterisan Gauss-ovom raspodjelom čvrstoće kon-

While ductile failure of reinforced concrete structure elements occurs simultaneously along the failure surface and is characterized by Gaussian distribution of

strukcije, bez uzimanja efekta veličine elementa, na kvazikrti otkaz značajno utiče veličina elementa i za velike elemente se pojavljuju ekstremne statističke vrijednosti po modelu najslabije karike, što vodi, prema [2], do Weibull-ve raspodjele čvrstoće konstrukcije (uz pretpostavku da se otkaz dešava sa početkom mikro prslina).

Lognormalna raspodjela je vrlo dobar model za proučavanje otkaza usljed zamora i njegove značajne primjene u području održavanja. Lognormalna funkcija raspodjele vjerovatnoće data je izrazom,

$$f(x) = \frac{1}{s \cdot x \cdot \sqrt{2p}} e^{\left[\frac{-(\ln x - l)^2}{2s^2} \right]} \quad (32)$$

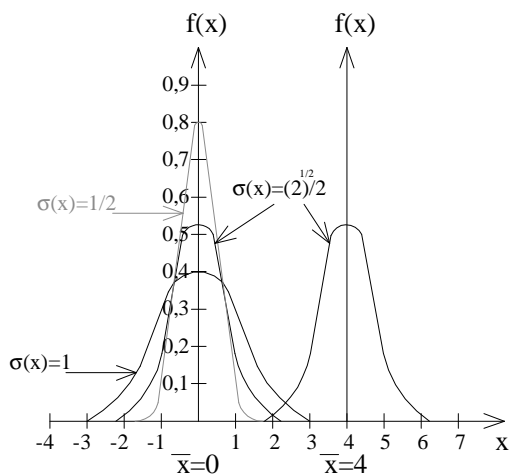
Normalna funkcija raspodjele vjerovatnoće data je izrazom,

$$f(x) = \frac{1}{s \sqrt{2p}} e^{\left[\frac{-(x-\bar{x})^2}{2s^2} \right]} \quad (33)$$

U radovima [7], [14], [16], [19], [20] i [22] opisane su detaljnije funkcije raspodjele slučajno promjenljive, koje se koriste za analizu pouzdanosti tehničkih sistema.

Za analizu pouzdanosti građevinskih konstrukcija obično se koristi normalna raspodjela vjerovatnoće u obliku,

$$f(x) = \frac{1}{s \sqrt{2p}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-m}{s} \right)^2} \quad (34)$$



Sl.7 - Neki oblici krive normalne raspodjele

Fig.7 - Some forms of normal distribution curves

Kumulativna funkcija normalne raspodjele može se ocijeniti samo numeričkim metodama. U svrhu evaluacije u praksi se koristi standardizovana kriva sa transformacijom promjenljive X u Z:

$$z = \frac{t - m}{s} \quad (35)$$

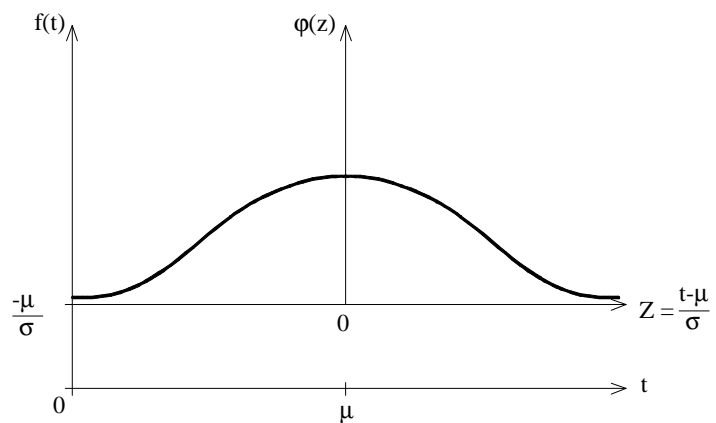
structural strength with no size effect, quasibrittle failures propagates, exhibits a strong size effect and, at large sizes, follows extreme value statistics of the weakest-link chain model, which leads, according to [2], to Weibull distribution of structural strength (provided that failure occurs at macro-crack initiation).

Lognormal distribution is a very good model for studying the failure of which is the cause of fatigue and has significant application in the field of maintenance. The Lognormal probability distribution function is given by

The Normal probability distribution function is given by

In the papers [7], [14], [16], [19], [20], and [22] are described in some detail the functions of distribution of random variable, which is used to analyze the reliability of technical systems.

For reliability analysis of civil structures commonly used normal probability distribution in form



Sl.8 - Funkcija gustoće vjerovatnoće za standardnu normalnu raspodjelu

Fig.8 - Probability density function for standardized normal distribution

Cumulative distribution function of normal distribution can only be evaluated by numerical methods. In practice one uses the standardized curve for the purpose of evaluation with the transformation of the variate X to Z as follows:

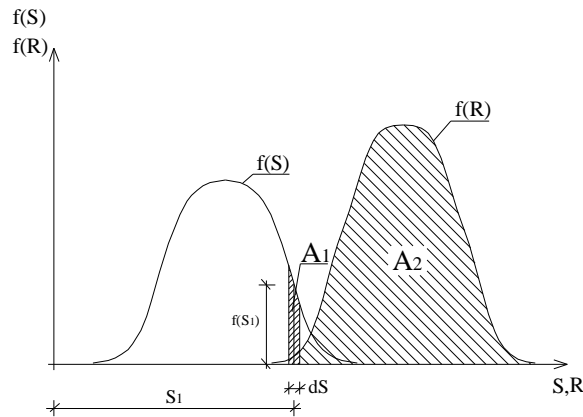
$$j(z) = \frac{1}{\sqrt{2p}} \cdot e^{-\frac{1}{2}z^2}; \quad -\infty < z < \infty \quad (36)$$

4 MJERE POUZDANOSTI

Normativi po kojima se vrši analiza nosivosti građevinskih konstrukcija zasnovani su na determinističkim i semi-probabilističkim proračunskim procedurama, sa usvojenim faktorima sigurnosti. Odabrani faktori sigurnosti za pojedine proračunske situacije su rezultat prethodno provedene analize uticajnih parametara primjenom teorije pouzdanosti.

4 MEASURES OF RELIABILITY

Standards in use to perform analysis of civil structures capacity are based on deterministic and semi-probabilistic design procedures, with the adopted safety factors. Selected safety factors for the individual design situations are the result of a previously performed analysis of influential parameters using the theory of reliability.



Sl.9 – Definicija pouzdanosti
Fig.9 – Definiton of reliability

Vjerovatnoća da je uticaj S_1 u intervalu ds jednaka je površini A_1 , i može biti izražena kao,

$$P\left(S_1 - \frac{ds}{2} \leq s \leq S_1 + \frac{ds}{2}\right) = f(S_1)ds = A_1 \quad (37)$$

Probability that the action S_1 is in the interval ds , equal to the area A_1 , can be expressed:

Vjerovatnoća da je otpornost veća od uticaja S_1 jednaka je površini A_2 :

$$P(R - S_1) = \int_{S_1}^{\infty} f(R)dR = A_2 \quad (38)$$

Probability that the resistance is greater than the action S_1 is equal to the area A_2 :

Pouzdanost je proizvod vjerovatnoće (37) i (38),

Reliability is the product of probability (37) and (38),

$$dR = f(S_1)ds \int_{S_1}^{\infty} f(R)dR \quad (39)$$

odnosno opšti izraz za pouzdanost je oblika:

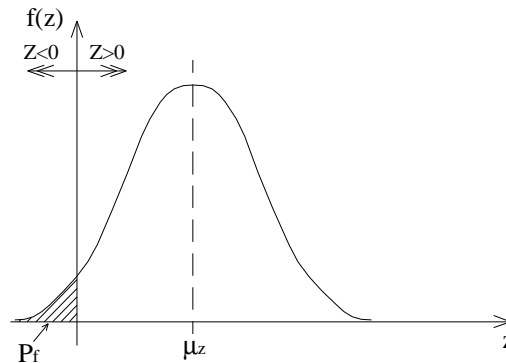
and the general expression for the reliability is:

$$R = \int dR = \int_{-\infty}^{\infty} f(S) \left[\int_S^{\infty} f(R)dR \right] dS \quad \text{ili} \quad R = \int dR = \int_{-\infty}^{\infty} f(R) \left[\int_{-\infty}^R f(S)dS \right] dR \quad (40)$$

Uvođenjem smjene $x = R - S$ ($x > 0$) i standardizirane slučajno promjenljive $Z = \frac{x - \bar{x}}{S_x}$ funkcija pouzdanosti ima oblik:

With the introduction of $x = R - S$ ($x > 0$) and standardized random variable $Z = \frac{x - \bar{x}}{S_x}$ reliability function has the form:

$$R = \frac{1}{\sqrt{2p}} \cdot \int_{-\frac{x}{S_x}}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}Z^2} dZ \quad (41)$$



Sl.10 – Standardizirana funkcija gustoće vjerovatnoće
Fig.10 – Standardized probability density function

Neadekvatnost sistema da ispuni zahtjeve, mjerena kao \$p_f\$, vezana je sa dijelom raspodjele gdje mjera sigurnosti \$Z\$ poprima negativne vrijednosti, a odovarajuća pouzdanost je,

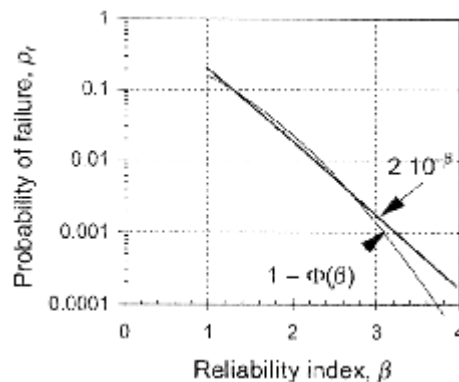
$$R = 1 - p_f \quad (42)$$

Važna mjera adekvatnosti inženjerskog projektovanja je indeks pouzdanosti, definisan kao odnos između srednje vrijednosti i standardne devijacije mjere sigurnosti sistema.

$$b = \frac{m_z}{s_z} \quad (43)$$

Opšti izraz za indeks pouzdanosti u odnosu na prva dva momenta kapaciteta i funkciju zahtjeva može se napisati kao,

A general expression for the reliability index in term of the first two moments of the capacity and the demand function can be written as



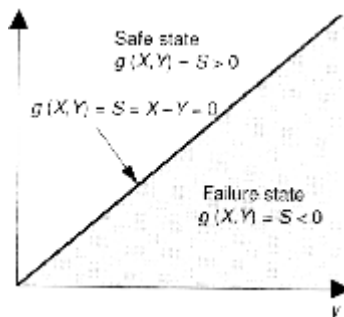
Sl.11 – Snaga aproksimacije vjerovatnoće otkaza kao funkcija indeksa pouzdanosti za normalnu raspodjelu \$S\$ i \$R\$ [16]
Fig.11 – Power approximation of the probability of failure as a function of the reliability index for normally distributed \$S\$ and \$R\$ [16]

$$b = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{s_R^2 - 2\Gamma_{RS} s_R s_S + s_S^2}} \quad (44)$$

Ocjena pouzdanosti podrazumjeva usporedbu proračunatog indeksa pouzdanosti \$\beta\$ sa vrijednosti indeksa pouzdanosti koji se smatra adekvatnim na osnovu prethodnih iskustava na datom sistemu. U tom smislu, mora se uspostaviti odnos između kapaciteta sistema i zahtjeva (uticaji). Ukoliko su kapacitet i uticaji jednaki sistem je u graničnom stanju, koje se može pisati u obliku,

The assessment of reliability mean comparing the calculated reliability index \$\beta\$ with that found to be adequate from previous experience for the given system. For this purpose, one must establish a relationship between the capacity of the system and the demand (load). If the capacity and load equal, this is a limit state, which can be written in the form

$$g(R, S) = R - S = 0 \quad (45)$$



Sl.12 – Stanje otkaza, stanje sigurnosti i granično stanje [20]
Fig.12 – Failure state, safe state and limit state [20]

Općenito su u građevinarstvu svi problemi funkcija više slučajno promjenljivih, gdje je važno da sve slučajno promjenjive imaju odgovarajuću pouzdanost. Pouzdanost sistema slučajno promjenljivih, kod kojeg svaki element mora funkcionisati da bi sistem funkcionisao predstavlja se kao serijski spoj uticajnih parametara [19], [22]:

$$R = 1 - P(\bar{x}_1 \cup \bar{x}_2 \cup \dots \cup \bar{x}_n) \quad (46)$$

i generalno je sistem međusobno nezavisnih slučajno promjenljivih, za koje vrijedi izraz,

$$R = P(x_1)P(x_2)\dots P(x_n) = \prod_{i=1}^{i=n} P(x_i) \quad (47)$$

Za m nezavisnih slučajno promjenljivih x_i , sa normalnom raspodjelom, dobije se m -dimenzionalna raspodjela gustoće prema multiplikacionom pravilu proračuna vjerovatnoće [12]:

$$f_x(x_1, x_2, \dots, x_m) = f_{x_1}(x_1) \cdot f_{x_2}(x_2) \cdot \dots \cdot f_{x_m}(x_m) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{m}{2}} \cdot \prod_{i=1}^m s_{x_i}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{x_i - m_{x_i}}{s_{x_i}}\right)^2\right) \quad (48)$$

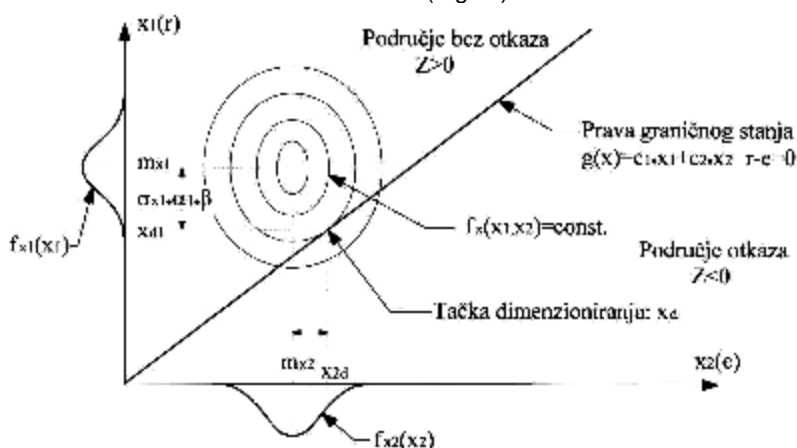
U slučaju dvije osnovne promjenjive: x_1 i x_2 , odnosno R (otpornost) and S (dejstva), dobiju se hiper površine, istih raspodjela gustoće, odnosno m -dimenzionalne kugle [12] (Slika 10).

Generally in the civil engineering all the problems are function of several random variable, where it is important that all random variables have adequate reliability. Reliability of random variable system, where each element must function that the system functioned, present as a serial combination of influential parameters [19], [22]:

and generally is a system of mutually independent random variable, for which valid expression:

For m independent random variable x_i , with normal distribution, the result is m -dimensional density distribution according to multiplication rule of probability calculation [12]:

In the case of two basic variables: x_1 and x_2 , and R (resistance) and S (action), get a hyper surface, the same distribution density, and m -dimensional balls [12] (Fig.10).



Sl.13 - Jednačina graničnog stanja u x - domenu [12]
Fig.13 - Limit state equation in x - area [12]

U praksi funkcija gustoće nije poznata i najviše što je poznato je set n slučajno promjenljivih X koje definiraju problem konstrukcije (kao što su mehaničke i geometrijske karakteristike, pokretna i stalna dejstva, dejstvo prednaprezanja itd.). Štaviše, kod proračuna betonskih konstrukcija granična stanja su obično formulisana preko funkcija slučajno promjenljivih $Y=Y(X)$ koje opisuju odgovor konstrukcije (odnosno napreznja, dilatacije itd.), i ovakvi izvodi su generalno dostupni samo u implicitnom obliku. Stoga je neophodan numerički pristup. Za rješavanje sistema slučajno promjenljivih razvijene su 3 metode rješavanja:

1. **Tačna metoda**, koja zahtjeva kao ulazne podatke poznate funkcije distribucije vjerovatnoće za sve promjenjive. U postupku rješavanja primjenjuje se numerička integracija i Monte Carlo metoda. Ovaj postupak zahtjeva opsežnu kompjutersku analizu.

2. **FOSM** (First order second moment method), gdje se u postupku rješavanja koriste Taylor-ovi redovi.

3. **PEM** (Point estimate method) koja se najviše koristi u analizama jer omogućava postepeni razvoj rješenja.

Analička integracija je moguća samo kod specijalnih slučajeva. Numeričko rješenje problema je jednostavnije, ali ako je pod integralom više od dvije slučajno promjenjive, numerička integracija ne može u svim slučajevima dati dovoljno tačno rješenje. Sa povećanjem broja varijabli značajno rastu proračunski zahtjevi, jer su u tim slučajevima integraciona područja složenije geometrijske figure, n -dimenzionalne sfere. Stoga su za određene metode razvijena rješenja na osnovu numeričke integracije, kao što su Monte Carlo metode, koje mogu biti primjenjene samo kod razvijenih sistematičnih metoda numeričkog uzorkovanja osnovnih promjenljivih X , kao što je Markov lanac metoda simulacije prezentirana u radu [3].

U radu [1] opisane su dvije metode Monte Carlo simulacije: direktna metoda simulacije i uzorkovanje prema važnosti. Direktna metoda simulacije obuhvata uzorkovanje osnovnih nekoreliranih varijabli prema njihovim odgovarajućim probalističkim karakteristikama i njihovo uvođenje u funkciju performansi Z , koja može biti izražena u funkciji od osnovnih slučajno promjenljivih X_i za odgovarajuća dejstva i čvrstoću konstrukcije

$$Z = Z(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = R - S \quad (49)$$

Srednja vrijednost i varijanca vjerovatnoće nezadovoljavajućih performansi,

$$P_u = \int \dots \int f_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (50)$$

može se izraziti kao

$$\overline{P_u} = \frac{N_u}{N} \quad (51)$$

uz pretpostavku da je N_u broj ciklusa simulacije za $Z < 0$ u ukupnom broju ciklusa simulacije N . Kod manjih vjerovatnoća nezadovoljavajućih performansi potreban je veći broj ciklusa simulacije. Ovaj nedostatak može se prevazići korištenjem uzorkovanja prema važnosti.

U ovoj metodi osnovna slučajno promjenljiva generirana je u saglasnosti sa pažljivo odabranom raspodjelom vjerovatnoće (funkcija gustoće važnosti $h_X(\underline{x})$) sa sred-

In practice the density function is not known and at the most some information is available only about a set of n basic random variables X which define the structural problem (e.g. mechanical and geometrical properties, dead and live loads, prestressing actions, etc.). Moreover, in concrete design the limit states are usually formulated in terms of functions of random variables $Y=Y(X)$ which describe the structural response (e.g. stresses, strains, etc.), and such derivation is generally only available in an implicit form. Therefore a numerical approach is required. For solving random variable systems have been developed 3 methods of solution:

1. **Accurate method**, which requires as input known probability distribution functions for the variable. In the process of resolving apply numerical integration and Monte Carlo methods. This procedure requires extensive computer analysis.

2. **FOSM** (First order second moment method), where in the process of solving the use Taylor's series.

3. **PEM** (Point estimate method) that is most used in the analysis because it allows a gradual development of solutions.

Analytical integration is possible only in special cases. Numerical solution of the problem is simpler, but when it is integral to more than two random variables numerical integration can not in all cases provide sufficient accurate solution. With the increasing number of variables significantly increasing the calculation requirements, because in these cases integration areas are complex geometric figure, n -dimensional sphere. Therefore, solutions based on numerical integration for the specific methods were developed, such as Monte Carlo simulation, which can be applied only to developed systematic methods of numerical sampling of basic variables X , or Markov chain simulation method presented in the paper [3].

The paper [1] described two Monte Carlo Simulation Methods: the direct simulation method and importance sampling. The direct simulation method comprises drawing samples of the basic noncorelated variables according to their corresponding probabilistic characteristics and then feeding them into the performance function Z , that can be expressed in terms of basic random variables X_i for relevant loads and structural strength

The mean and the variance of the unsatisfactory performance probability

can be expressed as

$$Var(\overline{P_u}) = \frac{(1 - \overline{P_u})\overline{P_u}}{N} \quad (52)$$

with assuming N_u to be the number of simulation cycles for which $Z < 0$ in a total N simulation cycles. By smaller unsatisfactory performance probabilities require larger numbers of simulation cycles. This deficiency can be overcome by using importance sampling.

In this method, the basic random variables are generated according to some carefully selected probability distributions (important density function $h_X(\underline{x})$) with

njim vrijednostima koje su bliže proračunskim vrijednostima nego njenoj originalnoj raspodjeli vjerovatnoće. Jednačina (50) za ovu metodu ima oblik

$$\bar{P}_u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \frac{f_X(x_{1i}, \dots, x_{ni})}{h_X(x_{1i}, \dots, x_{ni})} \quad (53)$$

gdje je

I – funkcija indikatora performansi sa vrijednostima 0 ili 1

f_X – originalna funkcija gustoće osnovnih slučajno promjenljivih

h_X – odabrana funkcija gustoće osnovnih slučajno promjenljivih

Primjena ove metode prezentirana je u radu [11].

Primjena Monte Carlo simulacije za analizu pouzdanosti armiranog betona i prednapregnutog betona data je u radu [4], na primjeru lučnog mosta.

U radu [5] opisana je primjena Fuzzy teorije u odnosu na teoriju vjerovatnoće. Fuzzy teorija omogućava analizu nesigurnosti u slučaju nedostatka informacija za razliku od teorije vjerovatnoće, koja je zasnovana na potpunom znanju o stohastičkim promjenama koje su rezultat slučajne prirode određenih veličina. Korištenjem Fuzzy kriterija sve nesigurnosti mogu se modelirati kroz interval vrijednosti, ograničen odgovarajućim minimalnim i maksimalnim ekstremom. Fuzzy funkcija pripadnosti $m = m_{\tilde{A}}(x)$ fuzzy seta $\tilde{A} \subseteq X$, za određeni nivo pripadnosti $a \in [0,1]$, je moguća raspodjela pogodna za opis informacija o nesigurnosti, tamo gdje raspodjela vjerovatnoće nije direktno dostupna.

mean values that are closer to the design value than their original probability distributions. Equation (50) for this method have form

where

I – performance indicator function that takes value of 0 or 1

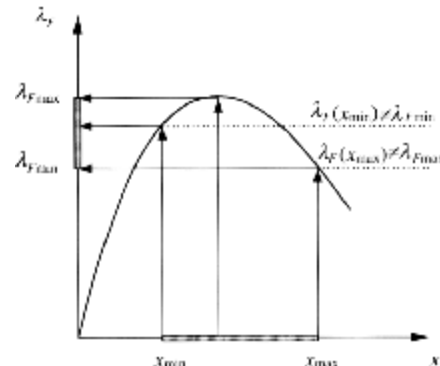
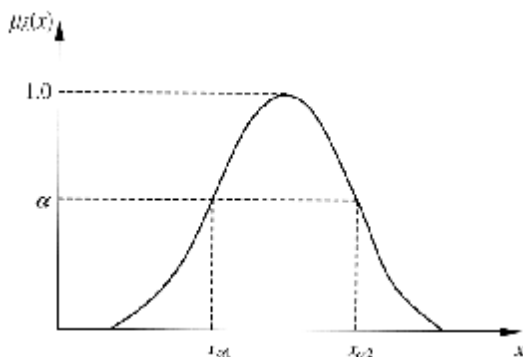
f_X – the original density function of the basic random variables

h_X – the selected density function of the basic random variables

Application of these methods is presented in the paper [11].

Application of Monte Carlo simulation for reliability analysis of reinforced concrete and prestressed concrete is provided in the paper [4], for example arc bridge.

The paper [5] describes the application of fuzzy theory in relation to the probability theory. Fuzzy theory allows analysis of uncertainty in case of lack of information as opposed to the probability theory, which is based on a perfect knowledge about the stochastic variability resulting from the random nature of the same quantities. Using a fuzzy criterion all uncertainties can be modeled through bands of values, bounded between suitable minimum and maximum extremes. A fuzzy membership function $m = m_{\tilde{A}}(x)$ of a fuzzy set $\tilde{A} \subseteq X$, for defined level of membership $a \in [0,1]$, is a possibilistic distribution suitable to describe uncertain information, when a probabilistic distribution is not directly available.



Sl. 14. (a) Pripadajuća funkcija i α nivo; (b) Mapiranje između intervala nepouzdanosti na osi x i odgovarajućeg intervala odgovora na osi I_F [5]

Fig. 14. (a) Membership function and α level; (b) Mapping between the interval of uncertainty on x and the corresponding response interval on I_F [5]

Primjena Taylor-ovih redova zahtjeva formulisanje i rješavanje derivacija, što je za viševarijabilne probleme zahtjevan zadatak, posebno kada je funkcija zadana implicitno u vidu krive, grafa ili kao rješenje MKE. Pojednostavljeni model pouzdanosti, prvobitno predstavljen kod projektovanja čeličnih konstrukcija, koristi samo srednju vrijednost i koeficijent varijacije za otpornost R i dejstva S u pojedinim graničnim stanjima da bi se dobio indeks pouzdanosti β , koji se proračunavao kao,

Application of Taylor's series requests in formulating and solving the derivative, which is for multi-variable problems demanding task, especially when the function is implicit in the form of the default curve, a graph or as a FEM solution. A simplified reliability model, first introduced in structural steel design, only uses the mean values and coefficients of variation for the resistance R and load S in a particular limiting state to obtain the reliability index β , which is computed as

$$b = \frac{\ln(m_R / m_S)}{\sqrt{V_R^2 + V_S^2}} \quad (54)$$

nezavisno od tipa raspodjele R i S .

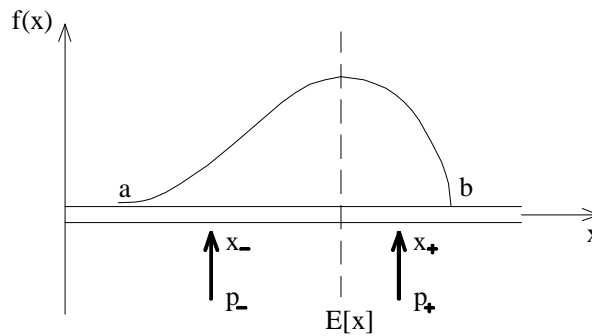
Primjeri su prezentirani u radovima [7], [14] i [16].

PEM metodu je prezentirao Rosenblueth 1975 g., a potpuno je razvijena 1981 g. Metoda je zasnovana na analogiji između distribucije vjerovatnoće i distribuiranog vertikalnog opterećenja na horizontalnoj krutoj gredi. Očekivana vrijednost odgovara položaju djelovanja sile koja uravnotežuje opterećenje (jedinična vrijednost) ili težištu opterećenja. Rosenblueth je predložio da se parametri očekivane vrijednosti i standardne devijacije odrede iz analogije sa slobodno oslonjenom gredom.

regardless of the type of distribution of R and S .

Examples are presented in the papers [7], [14] and [16].

PEM method was presented by Rosenblueth 1975, and is fully developed in 1981. Method is based on the analogy between probability distributions and distributed vertical load on the horizontal solid beam. Expected value corresponds to the position of action that balances the load force (unit value) or the center of gravity of the load. Rosenblueth proposed that the parameters of the expected value and standard deviation determine according to the analogy with the simple beam.



Sl.15 – Distribucija vjerovatnoće – analogija sa krutom gredom
Fig.15 – Distribution of probability – solid beam analogy

Reakcije p_- i p_+ su dvije ravnotežne tačke funkcije distribucije $f(x)$. Primjenom postavki teorije pouzdanosti mogu se postaviti slijedeće jednačine:

- Uslov ravnoteže:

$$p_+ + p_- = 1 \quad (55)$$

- Očekivana vrijednost:

$$p_+x_+ + p_-x_- = E[f(x)] = \bar{x} \quad (56)$$

- Mjera rasipanja

$$p_+(x_+ - \bar{x})^2 + p_-(x_- - \bar{x})^2 = S[f(x)]^2 = S^2[x] \quad (57)$$

- Asimetrija raspodjele:

$$p_+(x_+ - \bar{x})^3 + p_-(x_- - \bar{x})^3 = b(1)S^3[x] \quad (58)$$

Rješenje jednačina (55) do (58) su:

Solutions of equations (55) to (58) are:

$$p_+ = \frac{1}{2} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \left[\frac{b(1)}{2}\right]^2}} \right]; p_- = 1 - p_+; x_+ = \bar{x} + S[x] \sqrt{\frac{p_-}{p_+}}; x_- = \bar{x} - S[x] \sqrt{\frac{p_+}{p_-}} \quad (59)$$

Kod standardizirane normalne raspodjele može se usvojiti $b(1) = 0$ tako da izrazi (59) imaju oblik:

With standardized normal distribution can be adopted $b(1) = 0$ so that expressions (59) have the form:

$$p_+ = p_- = \frac{1}{2}; x_+ = \bar{x} + S[x]; x_- = \bar{x} - S[x] \quad (60)$$

Na osnovu određenih tačaka slučajno promjenjivih x i funkcionalne zavisnosti x i y dobiju se vrijednosti funkcije $y(x)$, $y +$ i $y -$, korištenjem izraza,

$$E[y^M] = p_- y_-^M + p_+ y_+^M \quad (61)$$

gdje M odgovara broju poznatih momenata za slučajno promjenjivu x .

On the basis of certain points of random variable x and the functional dependence x and y get the value of the function $y(x)$, $y +$ and $y -$, using the expression,

where M corresponds to the number of known moments for random variable x .

5 ANALIZA POUZDANOSTI VEZE PREFABRIKOVANE PLOČE I MONOLITNOG ZIDA

U periodu 2004. – 2008. godina provedena su eksperimentalna i numerička istraživanja veze prefabrikovane ploče i monolitnog zida (slika 16), sa ciljem definisanja mehanizma rada ovakve veze. Detalji istraživanja i rezultati istraživanja prezentirani su u radovima [23] i [24].

Numerički modeli su urađeni korištenjem MKE i Link elemenata modeliranih korištenjem eksperimentom dobijenog $M-f$ radnog dijagrama (slika 17) [24]. Uporedni rezultati provedenih numeričkih istraživanja prezentirani su na slici 18. Istraživanjem je utvrđeno da i monolitne veze imaju određen stepen popustljivosti. Iz mnoštva rezultata ovdje se daju dvije vrijednosti stepena popustljivosti prefabrikovane veze u odnosu na monolitnu:

- Eksploataciono opterećenje - $\gamma_{\text{calc.,serv.}} = 0.92$
- Granično opterećenje sa faktorom sigurnosti 1.75 -

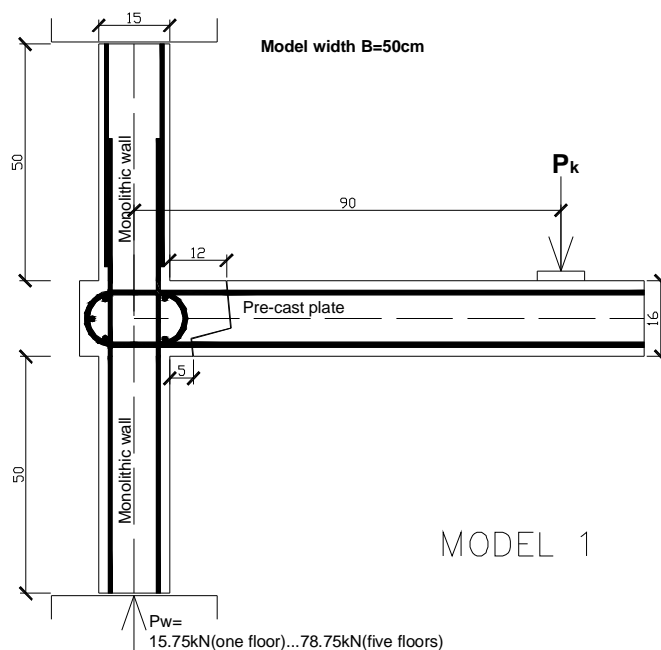
$\gamma_{\text{calc.,1.75}} = 0.90$

5 RELIABILITY OF THE PRECAST PLATE-MONOLITHIC WALL CONNECTION

In the period 2004th-2008th years, were performed experimental and numerical research of precast plate – monolithic wall connection (fig.16), with the aim of defining the work mechanism of such connections. Details of the research and results are presented in the papers [23] and [24].

Numerical models are done using FEM and Link elements modeled in the experiment obtained using $M-\phi$ working diagram (Fig.17) [24]. Comparative results of the conducted numerical studies are presented in Figure 18. Research has found that the monolithic connection have a certain degree of yielding. From the many results here are two values of the degree of prefabricated connections yielding relatively to the monolithic:

- Serviceability load - $\gamma_{\text{calc.,serv.}} = 0.92$
- Ultimate load with safety factor 1.75 - $\gamma_{\text{calc.,1.75}} = 0.90$



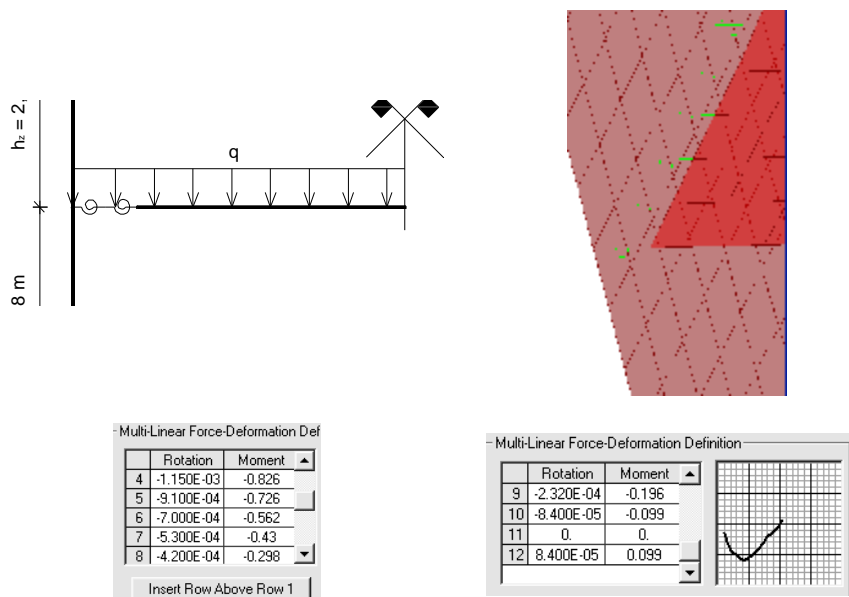
Sl. 16 – Montažna veza montažne ploče i monolitnog zida
Fig. 16 – Precast connections of precast plate and monolithic wall

U radu [23] detaljno su dati rezultati eksperimentalnog istraživanja. Ovdje se daju uporedne vrijednosti stepena popustljivosti prefabrikovane veze u odnosu na monolitne:

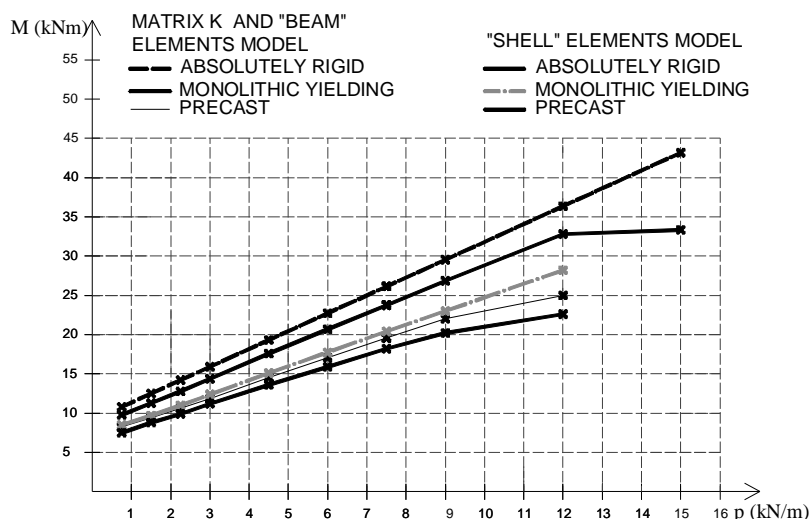
- $\gamma_{\text{exp.serv.}} = 0.907 \div 0.913$
- $\gamma_{\text{exp,1.75}} = 0.897 \div 0.903$

The paper [23] have detailed the results of experimental research. Here give comparative values of the degree of prefabricated connections yielding relatively to the monolithic:

- $\gamma_{\text{exp.serv.}} = 0.907 \div 0.913$
- $\gamma_{\text{exp,1.75}} = 0.897 \div 0.903$



Sl. 17 – MKE model [24]
Fig. 17 – FEM Model [24]



Sl. 18. Računske krive oslonački moment - opterećenje (M-p) za analizirane numeričke modele
Fig. 18. Calculation curves support moment – load (M-p) for analyzed numerical models

Usporedba rezultata pokazuje zadovoljavajuću tačnost numeričkih modela. Da bi se verificirali prezentirani rezultati neophodna je analiza pouzdanosti dobijenih karakterističnih vrijednosti u cilju definisanja stepena sigurnosti (faktora sigurnosti) analiziranog prefabrikovanog sistema građenja.

5.1 Analiza popustljivosti veze

Provedena analiza pouzdanosti stepena popustljivosti istraživane veze prefabrikovane ploče i monolitnog zida definisana je izrazom datim u radu [8],

$$a = \frac{S_f \cdot L_{pl.}}{B_{pl.}} = \frac{S_f \cdot L_{pl.}}{E \cdot I_{pl.}} \quad (62)$$

Comparison of results showed a satisfactory accuracy of the numerical model. To verify the presented results is necessary reliability analysis of the obtained characteristic values with the aim of defining the safety degree (factor) of analyzed prefabricated building systems.

5.1 Analysis of the connection yielding

Reliability analysis of yielding degree of researched precast plate-monolithic wall connection, defined by expression given in the paper [8], was performed

Analiza je urađena uz pretpostavku normalne funkcije raspodjele vjerovatnoće za uticajne parametre. Raspon ploče je usvojen konstantan $L_{pl}=6,15m$, a koeficijent iskrivljenosti raspodjele $b_1=0$. Dakle, analiziran je stepen popustljivosti kao funkcija tri slučajno promjenljive $a = f(S_f, E, I)$.

Pošto je ispitivanje provedeno na 3 monolitna i 3 montažna modela ne postoji dovoljan broj podataka za statističku obradu podataka, odnosno pouzdanu determinaciju parametara rasipanja rezultata. Stoga su obrađeni rezultati ispitivanja upoređivani sa do sada provedenim istraživanjima i preporukama prezentiranim u [6], [9], [14], [18] i [19].

Tako je Ellingwood 1980.godine, na osnovu provedenih opsežnih eksperimenata, preporučio reprezentativne vrijednosti koeficijenta varijacije, i to za betonske elemente izložene savijanju 8÷9,5%. Isti autor je definisao za spoj greda-stub koeficijent varijacije 10%. Mehlhorn je u [18] prezentirao opsežna istraživanja smicanja glatkih spojnica gdje je za 176 opita dobijen koeficijent varijacije 16%. Iste rezultate su dobili Hansen, Olesen, Fauchart i Cortini. Pommeret je dobio koeficijent varijacije 12÷15%, Laing 17÷18%, Pume 13%. U radu [13] je prezentirana statistička obrada rezultata ispitanih 95 modela za koje je dobijen koeficijent varijacije 12%.

Na osnovu prethodnih navedenih podataka i rezultata eksperimenata analiza je provedena za koeficijente varijacije 10 - 25 %. Za očekivanu vrijednost je usvojena eksperimentima dobijena srednja vrijednost $S_f = 3507,94 \text{ kNm/rad}$.

Kod proizvodnje prefabrikovanih elemenata veličina dopuštene greške zavisi od tipa konstrukcije, načina proizvodnje i montaže elemenata i najčešće se kreće u granicama od 3 ÷10 mm **Error! Reference source not found.**

Za potrebe definisanja pouzdanosti u ovom radu usvojena je tolerancija za širinu ploče modela $\pm 10\text{mm}$, tj. $b_{pl.} = 500 \pm 10 \text{ mm}$, a za debljinu ploče $\pm 10\text{mm}$, tj. $d_{pl.} = 160 \pm 3 \text{ mm}$.

Uz pretpostavku standardizovane normalne raspodjele i karakterističnih 5%-fraktilnih vrijednosti dozvoljenih odstupanja, koeficijenti varijacije su:

- za širinu modela CV = 1,22 % (usvojeno 1,5%)
- za debljinu ploče CV = 1,13 % (usvojeno 1,5%)

Razlika eksperimentom utvrđenih reprezentativnih vrijednosti modula elastičnosti betona monolitnih i montažnih modela je 4,78%. Ova razlika ima odraz na različite deformacione karakteristike. Međutim provedena eksperimentalna i numerička istraživanja su pokazala da utvrđena veličina razlike nije imala značajan uticaj na uporednu analizu stepena popustljivosti monolitnih montažnih modela. Pošto su izrazi za određivanje modula elastičnosti u funkciji čvrstoće na pritisak betona, ovdje se u nedostatku dovoljnog broja podataka uzimaju preporučene vrijednosti koeficijenata varijacije, zasnovane na opsežnim istraživanjima pojedinih autora.

Ellingwood je 1980. god. predložio za armirani betonski element opterećen na savijanje koeficijent varijacije 14% [14]. Bljugar je prilikom analize spojeva zidova usvojio koeficijent varijacije CV=12,8% [6]. Zasnovano na rezultatima istraživanja koja su uradili Entroy 1960, Murdock 1953, Rusch 1969, Mirza 1979,

The analysis is done assuming a normal probability density function for the influential parameters. The span of plate was adopted $L_{pl}=6,15m$, and coefficient of distribution distortion $b_1=0$. Therefore, the yielding degree as a function of three random variables $a = f(S_f, E, I)$ was analyzed.

Because the testing performed on the 3 monolithic and 3 precast models 3 was not enough data for statistical data processing, and reliable determination of scattering results parameters. Therefore, the obtained results of experimental research compared with results of so far performed research and recommendations presented in [6], [9], [14], [18] and [19].

On the basis of extensive experiments Ellingwood 1980's recommended a representative coefficient of variations, for concrete elements exposed to bending, from 8 to 9.5%. The same author has defined for the beam-column connection coefficient of variation of 10%. Mehlhorn in [18] presented extensive studies of smooth shear connectors, where for the 176 experiments obtained coefficient of variation 16%. The same results were obtained Hansen, Olesen, Fauchart and Cortini. Pommeret got a coefficient of variation 12-15%, Laing 17 ÷18%, Pume 13%. The paper [13] presented a statistical analysis of the testing results with 95 models, for which the obtained coefficient of variation of 12%.

Based on these previous data and results of experiments, analysis for the coefficient of variation from 10 to 25% was performed. The experiment obtained mean value $S_f = 3507,94 \text{ kNm/rad}$ was adopted as the expected value.

By production of precast elements, size of permitted deviation depends on the type of structures, production procedure and erection procedure, and often is within the limits of 3 to 10mm **Error! Reference source not found.**

For the purposes of the definition of reliability in this paper, tolerance for the width of panel models was adopted $\pm 10\text{mm}$, ie., $b_{pl.} = 500 \pm 10 \text{ mm}$, and for a plate thickness $\pm 10\text{mm}$, ie., $d_{pl.} = 160 \pm 3 \text{ mm}$.

Assuming standardized normal distribution and typical 5%-fractil values of permitted deviations, coefficients of variation are:

- for width of the model CV = 1.22 % (adopted 1.5%)
- for plate thickness CV = 1.13% (adopted 1.5%)

Difference of value of modulus of elasticity of precast and monolithic model concrete determined with experiment is 4.78%. This difference is reflected in different deformation characteristics. However, conducted experimental and numerical studies have shown that defined size of differences had no significant effect on the comparative analysis of the yielding degree of monolithic and precast models. Since the expressions for determining the modulus of elasticity in the function of compressive strength of concrete, here is the lack of sufficient data to take the recommended values of coefficients of variations, based on extensive research of individual authors.

Ellingwood in 1980. proposed for reinforced concrete elements loaded in bending coefficient of variation of 14% [14]. Bljugar during the analysis of compound walls adopted coefficient of variation CV = 12.8% [6]. Based on the results of research that is done Entroy 1960,

Melchers je prezentirao u tabeli 8.7 [19] koeficijente varijacije, odnosno standardne devijacije koje se kreću od 2,8 MPa za odličan beton do 5,6 MPa za loš beton. Ovo su rezultati za čvrstoće na pritisak $f_c > 28$ MPa. Za čvrstoću na pritisak nominalne vrijednosti 30 MPa koeficijent varijacije je: $CV=9,33\%$ za odličan beton, a $CV=18,66\%$ za loš beton.

Za analizu pouzdanosti u ovom radu usvojeni su koeficijenti varijacije kao i kod krutosti spoja 10 - 25 %.

Usvojena očekivana vrijednost je $E_c = 34975 \text{ MN} / \text{m}^2$.

Za funkciju tri slučajno promjenljive $y = y(x_1, x_2, x_3)$ vrijedi:

$$y_{\pm\pm\pm} = y(\bar{x}_1 \pm s[x_1], \bar{x}_2 \pm s[x_2], \bar{x}_3 \pm s[x_3]) \quad (63)$$

Težinski koeficijenti p su:

$$\begin{aligned} p_{+++} = p_{---} &= \frac{1}{2^3}(1 + r_{12} + r_{23} + r_{31}); p_{++-} = p_{--+} = \frac{1}{2^3}(1 + r_{12} - r_{23} - r_{31}) \\ p_{+-+} = p_{-+-} &= \frac{1}{2^3}(1 - r_{12} - r_{23} + r_{31}); p_{+--} = p_{-++} = \frac{1}{2^3}(1 - r_{12} + r_{23} - r_{31}) \end{aligned} \quad (64)$$

Očekivana vrijednost je:

$$E[y^M] = p_{+++}y_{+++}^M + p_{++-}y_{++-}^M + \dots + p_{---}y_{---}^M \quad (65)$$

Pošto je moment inercije I funkcija dvije slučajno projenljive $I = f(b_{pl}, h_{pl})$, prethodno je urađena analiza statističkih parametara momenta inercije. Statističkom obradom podataka za širinu modela i debljinu ploče dobijen je koeficijent korelacije: $r_{b_{pl},h_{pl}} \approx 0$. Prema tome težinski koeficijenti su:

$$p_{++} = p_{+-} = p_{-+} = p_{--} = \frac{1}{4}; I = \frac{b_{pl} \cdot h_{pl}^3}{12}$$

a proračunata varijacija,

$$V(I) = 5,97 \%$$

U daljnjem proračunu usvojena je varijacija $V(I) = 6,0\%$.

U radu je prezentirana analiza jednog statističkog slučaja. Pregled svih analiziranih statističkih slučajeva daje se u tabeli 1.

Slučaj (a)

$$\begin{aligned} \bar{I} &= 0,00003392 \text{ m}^4 \\ \bar{E}_c &= 34975 \text{ MN} / \text{m}^2 \\ \bar{S}_f &= 3507,94 \text{ kNm} / \text{rad} \\ L &= 6,15 \text{ m} = \text{const.} \end{aligned}$$

Koeficijenti korelacije eksperimentalnih rezultata su: $r_{I,E_c} = 0,4; r_{I,S_f} = 0,9; r_{E,S_f} = 0,6$

$$\begin{aligned} I_+ &= 0,000035955 & E_{C+} &= 38472,5 & S_{f+} &= 3858,73 \\ I_- &= 0,000031884 & E_{C-} &= 31477,5 & S_{f-} &= 3157,15 \end{aligned}$$

Težinski koeficijenti su:

$$p_{+++} = p_{---} = \frac{1}{8}(1 + 0,4 + 0,9 + 0,6) = 0,3625$$

Murdock 1953, Rusch 1969, Mirza 1979, Melchers is presented in Table 8.7 [19] coefficient of variation or standard deviation ranging from 2.8 MPa for the excellent concrete to 5.6 MPa for the bad concrete. These are the results of compressive strength $f_c > 28$ MPa. For compressive strength with a nominal value 30 MPa the coefficient of variation is $CV = 9.33\%$ for the excellent concrete, and $CV = 18.66\%$ for the bad concrete.

For reliability analysis in this paper have been adopted the coefficient of variation as for connection stiffness from 10 to 25%. Expected value is adopted experimental mean value $E_c = 34975 \text{ MN} / \text{m}^2$.

For the function of three random variable $y = y(x_1, x_2, x_3)$ is valid:

Weight coefficients p are:

Expected value is:

Since the moment of inertia I is function of two random variable $I = f(b_{pl}, h_{pl})$, analysis of the preliminary statistical parameters of the moment of inertia were performed. Correlation coefficient of model width and thickness of plate was adopted $r_{b_{pl},h_{pl}} \approx 0$. Accordingly,

weight coefficients are:

and calculated variation is

In further calculations was adopted $V(I) = 6,0\%$.

The paper presented the statistical analysis of one case. Review of the all statistical cases is given in Table 1.

Case (a)

$$\begin{aligned} V(I) &= 6 \% \\ V(E_c) &= 10 \% \\ V(S_f) &= 6 \% \end{aligned}$$

Correlation coefficients of experimental results are:

$$r_{I,E_c} = 0,4; r_{I,S_f} = 0,9; r_{E,S_f} = 0,6$$

Weighting factors are:

$$p_{++-} = p_{--+} = \frac{1}{8}(1 + 0,4 - 0,6 - 0,9) = -0,0125$$

$$p_{+-+} = p_{-+-} = \frac{1}{8}(1 - 0,4 - 0,6 + 0,9) = 0,1125$$

$$p_{+--} = p_{-++} = \frac{1}{8}(1 - 0,4 + 0,6 - 0,9) = 0,0375$$

$a(I, E_c, S_f)$	a_{ijk}	P_{ijk}	$a_{ijk} \cdot P_{ijk}$	a_{ijk}^2	$a_{ijk}^2 \cdot P_{ijk}$
a_{+++}	17,036	0,3625	6,17555	290,225	105,2066
a_{++-}	13,939	-0,0125	-0,17424	194,296	-2,4287
a_{+-+}	20,968	0,1125	2,3589	439,657	49,4614
a_{+--}	17,156	0,0375	0,64335	294,328	11,0373
a_{-++}	19,346	0,0375	0,725475	374,268	14,0351
a_{-+-}	15,829	0,1125	1,78076	250,557	28,1877
a_{--+}	23,645	-0,0125	-0,29556	559,086	-6,9886
a_{---}	19,346	0,3625	7,01293	374,268	135,6721
			<u>18,227</u>		<u>334,183</u>

$$E[a] = 18,227; \quad E[a^2] = 334,183$$

$$V[a] = 334,183 - (18,227)^2 = 1,95947$$

$$s[a] = 1,3998$$

Varijacija stepena popustljivosti je:

Variation of yielding degree is:

$$V(a) = \frac{1,3998}{18,227} \cdot 100 = 7,68 \%$$

Na osnovu provedene statističke analize određena je minimalna vrijednost stepena popustljivosti za koju je vjerovatnoća manjih vrijednosti 5 % (karakteristična 5%-fraktilna vrijednost). Proračun je proveden primjenom standardizovane normalne raspodjele.

On the basis of the statistical analysis determined the minimum value of the degree of yielding, for which is probability of smaller value of 5% (typical 5% fractil value). The calculation is performed using the standardized normal distribution.

$$a_{0,05} = 18,227 - 1,64 \cdot 1,3998 = 15,931$$

Za proračunatu vrijednost oslonački moment će biti:

For above calculated value moment on support will be:

$$M_{osl.} = 0,888 \cdot \bar{M}$$

Tabela 1 – Analizirani statistički slučajevi
Table 1 – Analyzed statistical cases

Statistical cases	Moment of inertia I (m ⁴)		Modulus of elasticity E _c (MN/m ²)		Connection stiffness S _φ (kNm/rad)		Degree of yielding γ ¹	
	E[I]	V(I)%	E[E _c]	V(E _c)%	E[S _φ]	V(S _φ)%	V(γ)%	γ _{0,05}
Case (a)	0,00003392	6,0	34975	10,0	3507,94	10,0	7,68	0,888
Case (b)	0,00003392	6,0	34975	15,0	3507,94	15,0	11,31	0,878
Case (c)	0,00003392	6,0	34975	20,0	3507,94	25,0	26,17	0,839
Case (d)	0,00003392	6,0	34975	25,0	3507,94	25,0	20,61	0,860
Case (e)	0,00003392	6,0	34975	10,0	3507,94	25,0	15,90	0,869
Case (f)	0,00003392	6,0	34975	25,0	3507,94	10,0	21,91	0,860

$$^1 g = \frac{a}{2+a}$$

Na osnovu provedene analize usvojena je maksimalna očekivana varijacija 27 %, odnosno zaokružena najveća vrijednost iz tabele 1.

Karakteristična 5 % fraktilna vrijednost a je,

$$a_{0,05} = 18,276 - 1,64 \cdot 4,2935 = 10,183$$

odnosno moment nad osloncem,

$$E(M_{osl.,0.05}) = 0,835 \cdot \bar{M}$$

Varijacija momenta nad osloncem je:
 $V(M_{osl.,0.05}) = 7,22\%$.

Based on the performed analysis adopted the maximum expected variation of 27%, ie., maximum value from Table 1.

Characteristics 5%-fractil value of α is,

or the moment on support is,

Variation of moment on support is:
 $V(M_{osl.,0.05}) = 7,22\%$.

5.2 Analiza vjerovatnoće otkaza veze

Ellingwood je 1980. god., na osnovu statističke obrade rezultata mjerenja na objektima, dao prijedlog reprezentativnih vrijednosti varijacija za stalno i pokretno opterećenje i to:

- za stalno opterećenje $V(g) = 10\%$
- za pokretno opterećenje $V(p) = 25\%$

Pošto je kod opterećenja ispitanih spojeva odnos $g:p = 2:1$, varijacija ukupnog opterećenja je $V(q) = 15\%$. Očekivana vrijednost momenta nad osloncem (u spoju), za eksploataciono opterećenje, je $E(M_q) = 14,17$ kNm.

Uz usvojene varijacije za stalno i pokretno opterećenje, granične vrijednosti uticajnih momenata su $M_{q,min} = 12,04$ kNm i $M_{q,max} = 16,30$ kNm.

Srednja vrijednost momenta nosivosti utvrđena eksperimentom je: $\bar{M}_n = 42,67$ kNm

Uz uvažavanje analize pouzdanosti stepena popustljivosti spoja, provedene u prethodnoj tački, minimalna i maksimalna vrijednost momenta nosivosti spoja je $M_{n,min} = 39,58$ kNm i $M_{n,max} = 45,75$ kNm.

Mjerodavni statistički parametri su:

$$m_z = \bar{M}_n - \bar{M}_q = 42,67 - 14,17 = 28,5 \text{ kNm}$$

$$s_z^2 = s_{Mn}^2 + s_{Mq}^2$$

$$s_{Mn}^2 = (0,0722 \cdot 42,67)^2 = 9,491 \text{ (kNm)}^2$$

Indeks pouzdanosti je,

$$b = \frac{28,5}{3,743} = 7,61$$

odnosno vjerovatnoća otkaza je,

$$P_f = f(-7,61) = 1,445 \cdot 10^{-14}$$

Eksperimentom je utvrđena varijacija momenta loma 10 %. U tom slučaju je indeks pouzdanosti,

$$b = \frac{28,5}{4,767} = 5,98$$

a vjerovatnoća otkaza,

$$P_f = f(-5,98) = 1,325 \cdot 10^{-9}$$

U tabeli 2 date su preporučene minimalne vrijednosti indeksa pouzdanosti za klase pouzdanosti, preuzete iz reference [10].

Indeks pouzdanosti je definisan za početnu krutost prefabrikovane veze. Ako je indeks pouzdanosti $\beta < 2$, u radu [15] preporučuje se uvođenje u analizu rezidualne krutosti veze.

5.2 Analysis of the probability of connection failure

On the basis of statistical processing results of measurements on objects, Ellingwood 1980th proposed representative values of variation for dead and live loads as follows:

- for dead load $V(g) = 10\%$
- for live load $V(p) = 25\%$

Since the load ratio of researched connection $g:p = 2:1$, the variation of the total load is $V(q) = 15\%$. Expected value of moment on support (in connection area), for service load, is $E(M_q) = 14,17$ kNm.

With variations adopted for the dead and live loads, the limit value of moments are $M_{q,min} = 12,04$ kNm and $M_{q,max} = 16,30$ kNm.

Average value of moment capacity determined in the experiment is: $\bar{M}_n = 42,67$ kNm

With the appreciation of the reliability analysis of degree of yielding, implemented in the preceding paragraph, the minimum and maximum value of connection moment capacity is $M_{n,min} = 39,58$ kNm and $M_{n,max} = 45,75$ kNm.

The relevant statistical parameters are:

$$s_{Mq}^2 = (0,15 \cdot 14,17)^2 = 4,518 \text{ (kNm)}^2$$

$$s_z^2 = 9,491 + 4,518 = 14,009$$

Reliability index is,

or probability of failure is,

Experimental value of variation of failure moment is 10%. In this case, the reliability index is,

and the probability of failure,

In table 2 are given recommended minimum values of reliability index for reliability classes RC, taken from reference [10].

Reliability index is determined by the initial stiffness of the precast connection. If the reliability index $\beta < 2$, the paper [15] recommends the introduction to the analysis of residual connection stiffness.

Tabela 2 – Preporučene minimalne vrijednost indeksa pouzdanosti b (ULS) [10]
 Table 2 – Recommended minimum values of reliability index b (ULS) [10]

Reliability classes	Minimum values for b	
	Reference period of 1 year	Reference period of 50 years
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

6 ZAKLJUČCI

Analiza građevinskih konstrukcija podrazumjeva viševarijabilne probleme, gdje su skoro sve varijable stohastičke. Prvi korak u analizi pouzdanosti je definisanje funkcije gustoće vjerovatnoće pojedinih varijabli. Postupci koji se primjenjuju svode se na upoređivanje zakonitosti promjene varijable sa uobičajenim zakonitostima koje se koriste u građevinarstvu, opisanim u radu. Pouzdanost definisanja zakonitosti je veća što je veća baza podataka provedenih istraživanja određene varijable. Kod prefabrikovane gradnje pouzdanost prije svega zavisi od pouzdanosti veza prefabrikovanih elemenata. Realan mehanizam rada veze može se utvrditi samo eksperimentom. Stoga kod prefabrikovanih veza ostaje problem unificiranja postupaka analize. Povećanje baze podataka o ponašanju pojedinih montažnih veza daje mogućnost za primjenu analize pouzdanosti u ovom području građevinarstva. U tom smislu analiza pouzdanosti prezentirana u ovom radu povećava postojeću bazu statističkih podataka potrebnih za definisanje pouzdanosti prefabrikovanih veza. Analiza je urađena za eksperimentom utvrđene srednje vrijednosti i varijacije, kao i za varijacije preporučene od autora koji su se bavili razmatranom problematikom. Za analizu je usvojena normalna raspodjela slučajno promjenljivih. Koeficijenti korelacije između pojedinih slučajno promjenljivih su usvojeni za uslove eksperimenta. Zbog nedovoljnog broja ispitanih uzoraka za primjenu pouzdane statističke procedure, koeficijenti korelacije su reducirani na očekivane minimalne vrijednosti. Usvojena je redukcija koeficijenta korelacije r_{I,S_f} i r_{E_C,S_f} za 20%. Naime, smatra se da slučajno promjenljive imaju jaku korelaciju ako je njihov koeficijent korelacije $\rho \geq 0,50$. Pošto je korelacija momenta inercije i krutosti spoja, kao i krutosti spoja i modula elastičnosti betona, kod ispitanih montažnih veza jaka, u sklopu diskusije su razmatrani koeficijenti korelacije umanjeni na vrijednost koja je na donjoj granici dobre korelacije.

Prema tome usvojeni statistički parametri su:
 $r_{I,E_C} = 0,4$; $r_{I,S_f} = 0,72$; $r_{E_C,S_f} = 0,48$.

Varijacija stepena popustljivosti i moment nad osloncem su:

$$V(a) = 29,03\%$$

$$V(M_{osl.}) = 8\% < V(M_{osl.,exp.}) = 10\%$$

Indeks pouzdanosti ispitane prefabrikovane veze je $\beta = 5,98$.

Varijacija momenta nosivosti, za očekivane

6 CONCLUSIONS

Analysis of civil structures includes multivariable problems, where almost all stochastic variables. The first step in analyzing the reliability is definition of probability density function of individual variables. The procedures applied are reduced to comparing the law of the variable changes with the usual laws that are used in civil engineering, as described in the paper. Reliability of definition of laws is greater the larger the database conducted research specific variables. By prefabricated buildings the reliability mainly depends on the reliability of the precast connections. Realistic work mechanism of the connection can be established only in the experiment. Therefore, the precast connections remains problem of analysis procedures unification. Increase the database on the behavior of individual precast connections gives the possibility for the application of reliability analysis in this area of civil engineering. In this sense, the reliability analysis presented in this paper increases the existing base of statistical data required for defining the reliability of precast connections. Analysis is done for experiment determined the mean and variation, as well as variations recommended by authors who have dealt with issues under consideration. For the analysis adopted a normal distribution of random variable. Correlation coefficients between individual random variable adopted for the experiment conditions. Due to an insufficient number of tested samples for implementation of reliable statistical procedure, the correlation coefficients were reduced to the expected minimum values. Adopted is to reduce correlation coefficients r_{I,S_f} and r_{E_C,S_f} of 20%. It is considered that random variables have a strong correlation since the correlation coefficient is $\rho \geq 0,50$. Since the correlation between moment of inertia and connection stiffness, and connection stiffness and modulus of elasticity of concrete strong for researched precast connection, in the discussions were considered correlation coefficients reduced to a value that is at the lower limit of good correlation.

Accordingly, the correlation coefficients were adopted: $r_{I,E_C} = 0,4$; $r_{I,S_f} = 0,72$; $r_{E_C,S_f} = 0,48$

Variation of degree of yielding and moment on support are:

Reliability index of researched precast connection is $\beta = 5,98$.

Variation of moment capacity, for the expected

minimalne vrijednosti koeficijenta korelacije, je manja od usvojene za uslove eksperimenta. Na osnovu prethodne analize preporučuje se za potrebe definisanja pouzdanosti montažnih veza, koje se ponašaju slično kao ispitane predmetne montažne veze, koristiti sljedeće minimalne koeficijente korelacije:

- korelacija momenta inercije i modula elastičnosti betona $r_{l, Ec} = 0,40$,
- korelacija momenta inercije i krutosti veze $r_{l, Sf} = 0,72$,
- korelacija modula elastičnosti betona i krutosti veze $r_{Ec, Sf} = 0,48$,
- korelacija širine i debljine elementa $r_{b, h} = 0$

Ova preporuka važi za analize pouzdanosti konstrukcija za koje nisu provedena ili su u malom obimu provedena eksperimentalna istraživanja. Kod eksperimentalnih istraživanja većeg obima preporuka može biti konzervativna.

Analiza pouzdanosti, prezentirana u ovom radu, obuhvatila je nepouzdanosti mehaničkih veličina: opterećenja, geometrije i svojstava materijala. Međutim, pouzdanost građevinske konstrukcije zavisi od svih učesnika u izgradnji objekta (investitor, projektant, izvođač i nadzor). Za adekvatnu pouzdanost konstrukcije važne su sve faze «stvaranja» objekta, što podrazumjeva:

- kompetentnost lica ili tima za izradu projektnog zadatka i tenderske dokumentacije;
- odabir projektantske kuće i izvođačke firme sa kvalifikacionom strukturom radnika, opremom i referencama koje smanjuju mogućnost grešaka;
- sistem kontrole kvalitete u pogonima firme koja se bavi proizvodnjom prefabrikovanih konstruktivnih elemenata;
- kompetentnost i stručnost osoblja koje provodi nadzor i kontrolu kvaliteta radova, organizacija i funkcionalnost inspekcijских službi;
- pogodnost i primjenjivost zakonske regulative iz oblasti osiguranja kvaliteta, prava i obaveza svih učesnika građenja, kaznenih mjera i efikasnosti njihove primjene.

Pored prethodno navedenog, socijalne prilike i stanje morala u lokalnoj ili široj društvenoj zajednici takođe imaju uticaja na pouzdanost objekata. Stoga je za potpuno definisanje prihvatljive pouzdanosti građevinskog objekta neophodno analizirati sve navedene parametre.

Napomena:

Drugi autor (R. Folić) je zahvalan na finansijskoj podršci od strane Ministarstva nauke Republike Srbije u okviru projekta TR 16018.

minimum correlation coefficient, is less than the adopted for the experiment conditions. Based on performed analysis is recommended for defining the reliability of the precast connection, which behave similarly as researched precast connections, use the following minimum correlation coefficient:

- correlation between the moment of inertia and modulus of elasticity of concrete
- $r_{l, Ec} = 0.40$,
- correlation between the moment of inertia and connection stiffness $r_{l, Sf} = 0.72$,
- correlation between the modulus of elasticity of concrete and connection stiffness
- $r_{Ec, Sf} = 0.48$,
- correlation between width and thickness of the element $r_{b, h} = 0$.

This recommendation applies to the analysis of the reliability of structures that are not implemented or are in small scale experimental research was conducted. With large scale experimental research recommendations may be conservative.

Reliability analysis, presented in this paper, include the unreliability of mechanical quantities: load, geometry and material properties. However, the reliability of civil structures depends on all participants in born of building (investor, designer, contractor and supervision). For adequate reliability of structure all phase of "creating" building are important, which includes:

- competence of the person or team to create a project task and tender documents;
- selection of design houses and contractor with the adequate company qualifications structure of workers, equipment and references, which reduces the possibility of error
- a system of quality control facilities in the company that manufactures prefabricated structures elements;;
- competence and expertise of personnel who supervise and control the quality of work, organization and function of inspection services
- suitability and applicability of the legislation in the field of quality assurance, rights and obligations of all participants of construction, crime rate and efficiency of their application.

In addition to the foregoing, the social conditions and state of moral in the local or wider community also have an impact on the reliability of buildings. Therefore, for the full definition of acceptable reliability of buildings is necessary to analyze all of these parameters.

Note:

The second author (R. Folić) is grateful for the financial support by the Ministry of Science of the Republic of Serbia in the scope of the project TR 16018 .

7 LITERATURA REFERENCES

- [1] Ayyub B.M., Chao R.J., Patev, R.C.: *Reliability and Stability Assessment of Concrete Gravity Structures (RCSLIDE): Theoretical Manual*, Technical Report ITL-98-6, US Army Corps of Engineers, December 1998.
- [2] Bažant Z.P., Pang S.D.: *Reliability of Fracturing Concrete Structures and challenges of Stochastic Finite Element Modeling*, VIII International Conference on Computational Plasticity, COMPLAS VIII, CIMNE, Barcelona, 2005., pp. 1-5.
- [3] Beck J.L., Au S.K.: *Bayesian Updating of Structural Models and Reliability using Markov Chain Monte Carlo Simulation*, Journal of Engineering Mechanics, Vol.128, No.4 ASCE, April 2002., pp.380-391.
- [4] Biondini F., Bontempi F., Frangopol D.M., Malerba P.G.: *Reliability of material and geometrically non-linear reinforced and prestressed concrete structures*, Computers and Structures 82, Elsevier Ltd., 2004., pp. 1021-1031.
- [5] Biondini F., Bontempi F., Malerba P.G.: *Fuzzy reliability analysis of concrete structures*, Computers and Structures 82, Elsevier Ltd., 2004., pp. 1033-1052.
- [6] Bljucer, F.: *Design of Precast Concrete Structures*, Ellis Horwood Series in Civil Engineering.
- [7] Choi S.K., Grandhi R.V., Canfield R.A.: *Reliability-Based Structural Design*, Springer-Verlag, London, 2007.
- [8] CIB Report: *Draft guide for the design of precast wall connections*, Rotterdam, June 1985.
- [9] Englekirk, R.E.: *Seismic design of reinforced and precast concrete buildings*, John Wiley & Sons Inc., 2003.
- [10] European standard EN 1990:2002 Eurocode 0: Basis of structural design, CEN, 2004.
- [11] Gomes H.M., Awruch A.M., Rocha M.M.: *Reliability analysis of reinforced concrete structures*, Proceedings of 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SmiRT 14), Lyon, France, August 1997., pp. 47-54.
- [12] Grunberg, J.: *Stahlbeton und Spannbetontragwerke nach DIN 1045*, Springer Verlag Berlin, 2002.
- [13] Guillaud, F., Morlier, P.: *Transmission des efforts dans les assemblages d'elements prefabriques en beton arme*.
- [14] Harr, M.E.: *Reliability Based Design in Civil Engineering*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.
- [15] Kalouskova M., Novotna E., Šejnoha J.: *Reliability-Based Design of Precast Buildings*, Acta Polytechnica Vol.41, No.2/2001, Czech Technical University Publishing House, 2001., pp. 20–25.
- [16] Kottegodu N.T., Rosso R.: *Applied Statistics for Civil and Environmental Engineers*, Blackwell Publishing Ltd, 2008.
- [17] Krastavčević, M.: *Primena montažnog građenja, Javni i industrijski objekti od betona*, Časopis „Izgradnja“
- [18] Mehlhorn, G.: *Schwing, H., Tragverhalten von aus Fertigteilen zusammengesetzten Scheiben*, Wilhelm Ernst&Sohn, Berlin 1977.
- [19] Melchers, R.E.: *Structural Reliability Analysis and Prediction*, John Willey & Sons, Inc., New York, 1999.
- [20] Pham H.: *Handbook of Reliability Engineering*, Zbornik radova, XXIV. Kongres Društva za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije, Divčibare, Srbija, 15-17 October 2008, pp. 273–282.
- [21] Schnetgoeke R., Hosser D.: *Application of reliability-based system assessment using a bridge example*, Construction Informatics Digital Library <http://itc.scix.net>
- [22] Vujanović, N.: *Teorija pouzdanosti tehničkih sistema*, Vojnoizdavački i novinski centar, Beograd 1990.
- [23] Zenunović D., Folić R.: *Rigidity of Precast Plate – Monolithic Wall Connection*, POLLACK PERIODICA, An International Journal for Engineering and Informations Sciences, Vol.2, No.3, 2007, pp .85–96.
- [24] Zenunović D., Folić R.: *Modeling of RC prefabricated plate and RC monolithic wall connection*, Zbornik radova, XXIV. Kongres Društva za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije, Divčibare, Srbija, 15-17 October 2008, pp. 273–282.
- [25] Knežević M., Zejak R.: *Neuronske mreže – primjena za izradu prognoznog modela eksperimentalnog istraživanja za vitke armirano-betonske stubove*, Materijali i konstrukcije 51 (2008) 1, Beograd, pp. 41–56.

REZIME

POUZDANOST AB MONTAŽNIH VEZA

*Damir ZENUNOVIĆ
Radomir FOLIĆ*

U prvom dijelu rada date su teoretske osnove i pregled stanja aproksimativnih postupaka za analizu pouzdanosti. Nadalje, u radu je prezentiran nastavak istraživanja veze montažne ploče i monolitnog zida, obavljenih u periodu 2004.-2008. godina, koja su provedena sa ciljem definisanja mehanizma rada ovakvih veza. Rezultati istraživanja i preporuke autora koji su provodili slična istraživanja korišteni su za analizu pouzdanosti dobijenih rezultata. Za analizu veze montažne ploče i monolitnog zida korištena je metoda diskretnih tačaka. Na osnovu provedene analize u zaključcima se daju preporuke za analizu sličnih spojeva u građevinskoj nauci i praksi.

Ključne reči: analiza pouzdanosti, funkcija gustoće vjerovatnoće, indeks pouzdanosti, popustljivost, montažna veza, montažna ploča, monolitni zid

SUMMARY

RELIABILITY OF RC PRECAST JOINT

*Damir ZENUNOVIC
Radomir FOLIC*

In the first part of the work given the theoretical basis and review the status of procedures for the approximate analysis of reliability. Furthermore, in the paper was presented continuation of research of prefabricated connection of prefabricated plate and monolithic wall, performed in the period 2004th-2008th years, which were carried out with the aim of defining the work mechanism of such connections. Research results and recommendations of authors who have conducted similar studies were used to analyze the reliability of the obtained results. For analysis of the prefabricated connection of prefabricated plate and monolithic wall was used Point Estimated Method. Based on the analysis in the conclusions are given recommendations for the analysis of similar connections in civil engineering science and practice.

Key words: reliability analysis, probability density function, reliability index, yielding, prefabricated connection, prefabricated plate, monolithic wall

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 prihvaćaju 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 sopšten 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, u 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 priložima koristiti samo izuzetno uz obaveznu legendu. Prilozi se posebno označavaju arapskim brojevima, prema redosledu navođenja u tekstu. Objašnjenje tabele 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 stranica poglavlja 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 priložima.

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.

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

Izdavanje časopisa "Materijali i konstrukcije" finansijski su pomogli:



INŽENJERSKA KOMORA SRBIJE

**MINISTARSTVO ZA NAUKU I TEHNOLOŠKI
RAZVOJ SRBIJE**



**UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET**



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



INSTITUT IMS AD, BEOGRAD



**UNIVERZITET CRNE GORE
GRAĐEVINSKI FAKULTET - PODGORICA**