

Математички институт САНУ  
Кнеза Михаила 36  
11000 Београд  
Србија

Директору Математичког института САНУ,  
Проф. др Зорану Огњановићу,  
Научном већу Математичког института САНУ,  
Академику проф. др Драгошу Цветковићу

## Стручни извештај о учешћу на научном скупу



Поштовани,

У периоду од 17-20. фебруара 2019. године учествовао сам на научном скупу Нодикон 2019 – Прва међународна конференција из Нелинеарне динамике у Риму (NODYCON 2019 – First International Nonlinear Dynamics Conference) у Риму, Италија. Скуп је организован од стране Сапиенца Универзитета у Риму (Sapienza Universita di Roma), и одржан је на Факултету за грађевинарство и индустријско инжењерство (The Faculty for Civil and Industrial Engineering) у Риму.

На конференцији сам учествовао са излагањем рада у секцији Снимање и испитивање конструкција (Monitoring and Testing of Structures). Рад који сам излагао односио се на део истраживања спроведених у оквиру пројекта ОИ174001, координираног од стране Математичког института САНУ, а наслов рада је:

Katica (Stevanović) Hedrih, Stanko Brčić, Stepa Paunović  
**Application of photoelasticity to stress state analysis in dams: A brief review  
based on the results of Professor Vlatko Brčić**

На скупу су разматрани аспекти решавања одређених проблема нелинеарне динамике и савремена достигнућа у овој области.

Скуп је био организован у виду три уводна, пленарна предавања, одржаних на почетку скупа у базилици Светог Петра у ланцима (San Pietro in Vincoli), и 67 паралелних сесија одржаних у 3 дана на факултету за грађевинарство и индустријско инжењерство, и подељених по одговарајућим подобластима. Пленарна предавања су се тичала пројектовања конструкција узимајући у обзир и динамичку нелинеарност њиховог понашања (предавач: проф. Стивен Шо, САД), оператора и анализе процеса управљања механизмима (предавач: проф. Фридрих Пфајфер, Минхен, НЕМ), и управљање процесима уз коришћење нелинеарности и временског кашњења сигнала (предавач: проф. Хаијан Ху, Пекинг, НРК). Паралелне сесије су покриле више различитих области нелинеарне динамике, укључујући фундаменталну и математичку поставку

и анализу нелинеарних динамичких проблема, методе за решавање система једначина који се при тој анализи јављају, примену ових метода на проблеме управљања и активне контроле динамичких система и процеса, као и испитивање својстава и могућности производње новог типа материјала жељених и прилагодљивих динамичких својстава (метаматеријали).

Због начина организације скупа, нисам био у прилици да присуствујем свим сесијама, будући да се готово у сваком тренутку истовремено одржавало по њих 7, али присуствовао сам бар по једној сесији која се тичала сваког од горенабројаних питања. Посебну пажњу придао сам питањима метаматеријала, рачуна са изводима нецелог реда, математичког моделирања нелинеарних проблема, ублажавања дејства вибрација на конструкције и инжењерске примене развијених метода и модела. За мене најзначајнија излагања била су везана за примену динамичких апсорбера при ублажавању дејства земљотреса, унутрашња резонантна стања при вибрацији конструкција, коришћење извода нецелог реда при моделирању материјала и израду и испитивање својстава материјала посебних динамичких својстава - метаматеријала.

У оквиру научног скупа је изложено око 350 радова, а било је излагача из преко 20 земаља света. У паузама између сесија било је времена за стицање познанстава са бројним истраживачима и истакнутим научним радницима из области Нелинеарне динамике, како млађим и перспективним колегама, тако и реномираним и искуснијим професорима. Мој лични утисак је да су се у горе наведеним областима, којима сам поклатио највише пажње, посебно истакле група професора Мајкла Лимија са Технолошког института у Џорџији, САД (Michael Leemy, Georgia Institute of Technology, USA), и група професора Волтера Лакарбонаре са Факултета грађевинарства и индустријског инжењерства, Сапиенца Универзитета у Риму (Walter Lacarbonara, ITA), иначе председника организационог тима овог научног скупа.

На овом научном скупу наступао сам као део групе са пројекта ОИ174001, коју су сачињавале још и руководилац пројекта - проф. др Катица Стевановић Хедрих, на чију сам иницијативу и уз чију помоћ сам и учествовао на овом скупу, и др Ивана Атанасовска, од које сам на овом путу добио бројне савете везане и за научни рад.

Радови свих учесника на научном скупу објављени су у штампаној форми у виду двостраничних апстраката, а цели радови су јошувек у процесу рецензије за објављивање у Зборнику радова конференције Нодикон 2019 у едицији Шрингер зборника (Springer Proceedings).

Као прилог овом извештају достављам:

- Обавештење о прихватању рада за усмено излагање на скупу
- Фотокопију Потврде о учешћу на научном скупу
- Прве три и последњу страницу Књиге апстраката
- Објављени и излагани проширени апстракт са којим сам учествовао на скупу
- Неколико фотографија са научног скупа

Са поштовањем,

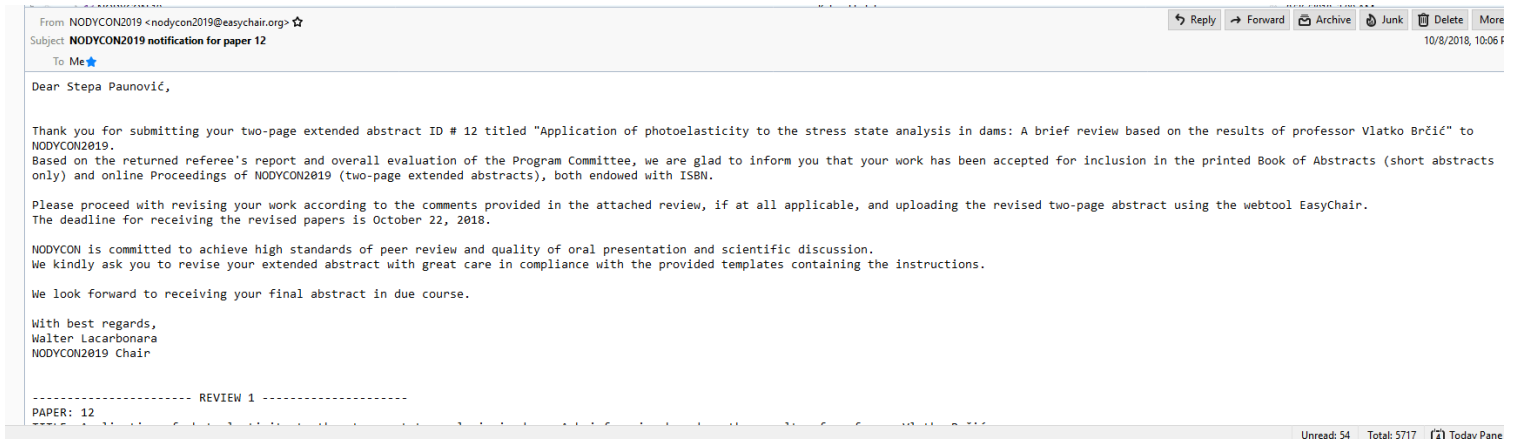


Степа Пауновић,  
истраживач приправник

У Нишу, 04.03.2019.

## ПРИЛОЗИ

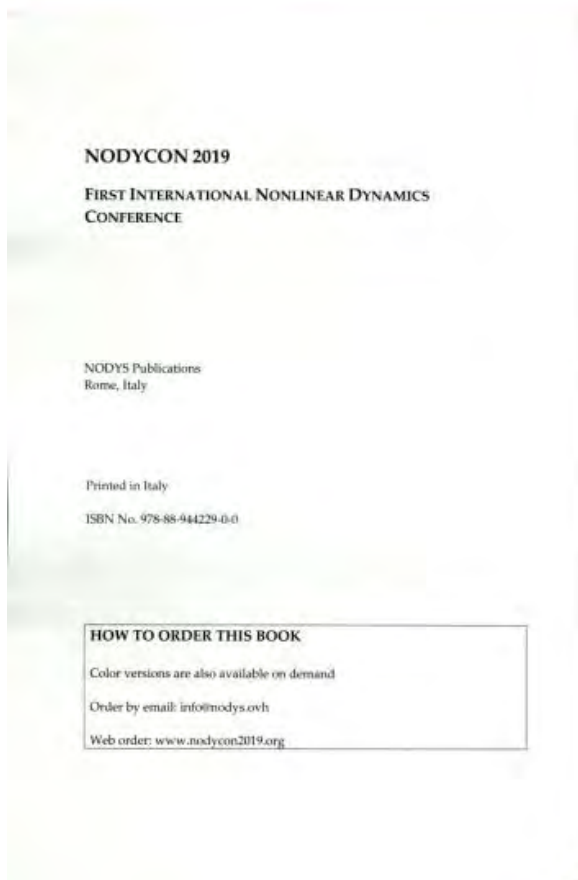
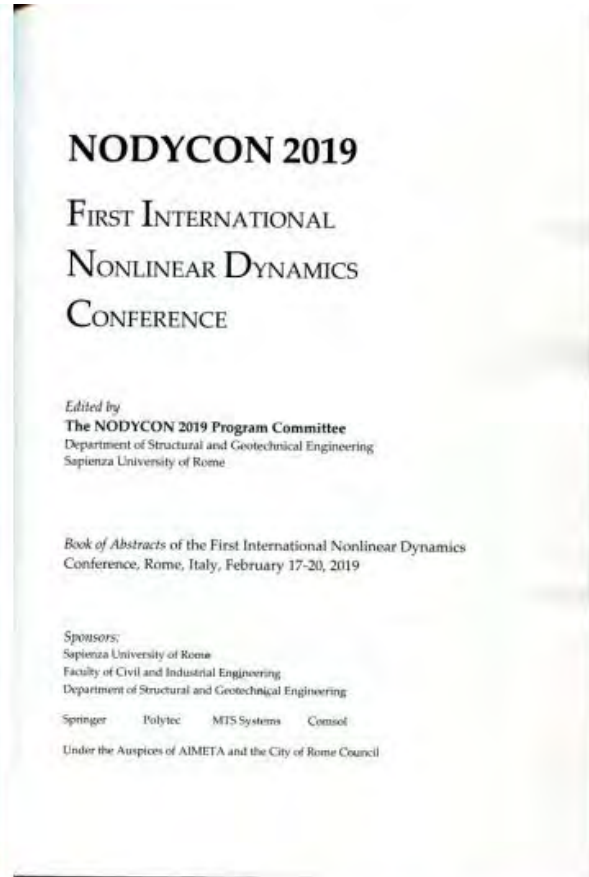
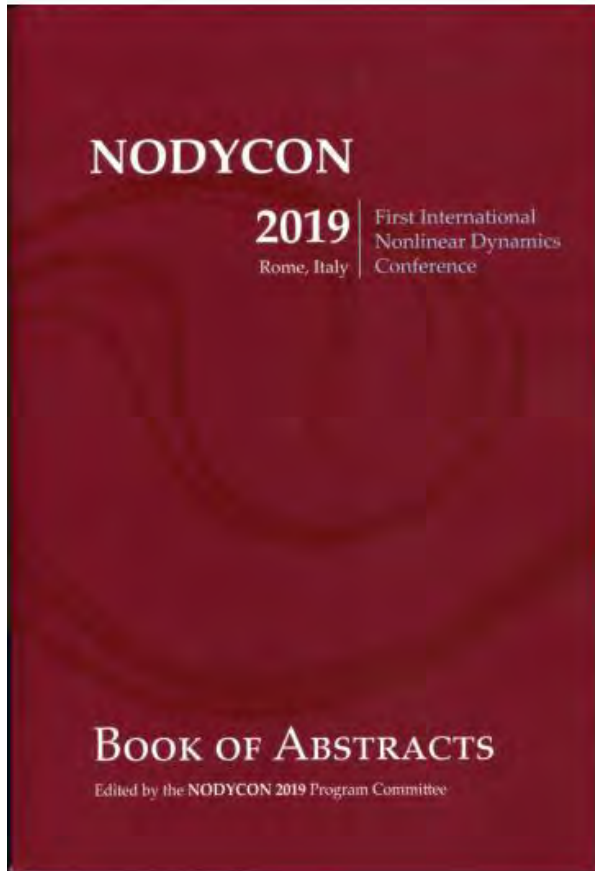
- Обавештење о прихватању рада за усмено излагање на скупу и штампање у Књизи апстраката



- Потврда о учешћу на научном скупу



- Прве три, и последња страница Књиге апстраката





- Фотографија двостраничног апстракта са којим сам учествовао на научном скупу

## Application of photoelasticity to the stress state analysis in dams: a brief review based on the results of professor Vlatko Brčić

Katica R. (Stevanović) Hedrih<sup>\*</sup>, Stanko V. Brčić<sup>\*\*</sup> and Stepa Paunović<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of Mechanics, Mathematical Institute of the Serbian Academy of Sciences and Arts, Belgrade, Serbia

<sup>\*\*</sup>Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Serbia

**Abstract.** Photoelasticity is a useful method for experimental testing of structures, one of the few that can provide a direct visual insight into the stress state in a tested model. Photoelastic method has been used in various types of problems, and in this Abstract we provide a brief review of the application of this method to the analysis of stress state in dams. Since there is relatively obscure literature on this subject and prof. V. Brčić (1919–2000) has conducted many researches and published several papers regarding the photoelastic testing of dams, this review is based mostly on his work. A short reference to some more recent results of other authors is also provided, including a commentary on application of this method to dynamic analyses. Prof. V. Brčić also presented lectures titled "Application of holography and hologram interferometry to photoelasticity" in 1969 and 1974 at CISM Udine (published in 1969 and 1974 by Springer-Verlag, Wien-New York).

### Introduction

Photoelasticity is one of the few methods for experimental testing of structures that provides a direct visual insight into the stress state in a tested specimen. Photoelastic testing has been used in a great variety of problems – ranging from teeth and porous structures analysis to machine parts, train wagon and dam modelling. The aim of this abstract is to give a brief review of the application of the photoelasticity to the stress state analysis of dams, since it has played an important role in dam design in the past and it still is a useful method for experimental testing of dams even today. However, experimental testing and construction of dams are very costly and relatively rare, thus there aren't a lot of scientific papers dealing with this kind of research. In the second half of the XX century many dams were built in Yugoslavia (now Western Balkans region) and many of them were designed and/or tested by prof. Vlatko Brčić, a prominent researcher and engineer of that time, who afterwards published several papers regarding experimental testing of dams. These papers have had a profound influence on the development of the photoelastic method and its practical application, and this Abstract is based mostly on the results presented therein.

### Results of professor Vlatko Brčić

Vlatko Brčić (1919-2000) was a renowned mathematician, engineer, professor, researcher and scientist. He has published several textbooks, monographs and scientific papers, introduced new subjects to several faculties in Yugoslavia and formed several laboratories. He was engaged in various researches in many research institutes in the region, but was also acknowledged world wide – he held lectures in Italy and USA, and had many fruitful collaborations. He has introduced photoelasticity to Western Balkans and contributed to the development and improvement of the method through combining it with holographic interferometry. Prof. Brčić has conducted numerous researches of dams under the hydrotechnical institute "Jaroslav Cherny", Serbia, and published some of his results in the form of original or coauthored papers. These papers provided a solid foundation for dam research and design, and key points of some of them are presented here.

### Photoelastic testing of dams

As prof. Brčić himself demonstrated in [1], his dam research has gone through several phases, as it became more and more complex and mature. In the beginning of his professional career, he used photoelastic analysis to investigate the stress concentrations in dams with openings, depending on the position of the opening. General shape gravity dams were considered and it was concluded that the stress state is least disturbed by the downstream position of the opening in the body of a dam. Afterwards he broadened this research to analyze the influence of the foundation soil on the stress concentration around the dam openings, while treating the soil as a homogeneous elastic continuum. Later on, he used the acquired knowledge to analyze the stress state in the buttress dam of the hydroelectric power plant Bajina Bašta in detail. This analysis gave valuable insight in stress state inside the dam buttresses and improved the dam design process. Later still, when he was solving the problem of the Jablanica dam foundation reconstruction, prof. Brčić investigated the influence of the shape and inclination angle of the foundation soil in vicinity of the dam abutment on the stress distribution inside the dam.

In one of his researches [2], prof. Brčić used photoelasticity to investigate the stress state in a multilayered medium, as well as the influence of discontinuities in bedrock supporting a dam. In the mentioned paper, two cases were studied – the Grančarevo dam and the Mratinje dam (220m high). Both dams are arch dams, so the representative horizontal cross section – an arc with the supporting bedrock and abutment – was modeled and tested. The main focus was modeling and examination of cracked (discontinuous) supporting bedrock



and its influence on the stress state inside the dams. Bedrock was modeled according to thorough geotechnical site investigations. The resulting isochromatics are shown in Figure 1. It was concluded that discontinuities in soil greatly influence the stress state in the dam and that both should always be considered and modeled together as a single system, with taking special care to adequately model the contact interface.

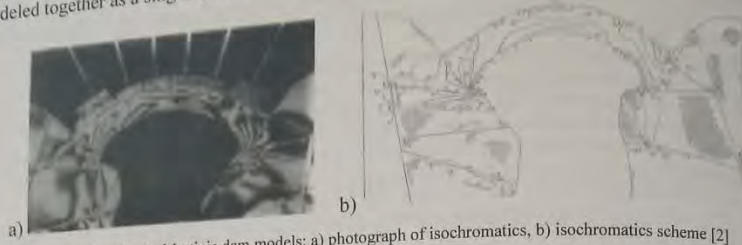


Figure 1: Results for Mratinje dam models; a) photograph of isochromatics, b) isochromatics scheme [2]

### Some more recent contributions in this field

Since the time of prof. Brčić's work photoelasticity has developed, mainly by including modern apparatus and wide use of computers. Testing process has become much more precise, significantly faster and almost completely automated through the use of image acquisition and processing, RGB interferometry and 3D printing (e.g. [3], Figure 2a), and it has been used in various fields - fracture mechanics, industry, composite materials and concrete analysis, but also for experimental testing of dams - for instance [4], results of which are shown in Figure 2b. High-speed cameras enabled photoelastic analysis of dynamic and transient problems, so now there are researches dealing with dynamic stress-wave propagation and seismic effects in various structures, including dams (e.g. [5]). The photoelastic method has already been used to analyze nonlinear material behavior, and combination of this type of models with the dynamic photoelasticity makes this method suitable for analyzing even some complex problems of nonlinear dynamics.



Figure 2: a) Isochromatics in a 3D printed specimen of concrete tested by stress freezing photoelastic method [3], b) Isoclines in the tested gravity dam for the three considered positions of a discontinuity in the foundation soil [4]

### Conclusions

Recently, most attention is directed towards detailed numerical modelling of structures, mostly by finite element method (FEM). However, results of prof. Brčić still remain important, perhaps even more so, for there weren't many researches of that kind up to this date. It should also be pointed out that numerical modeling cannot replace experimental testing entirely, so photoelasticity and FEM should be used as complement methods, especially in design of complex structures such as dams.

### Acknowledgments

Parts of this research were supported by the Ministry of Sciences and Technology of Republic of Serbia, through Mathematical Institute SASA, Belgrade, and Grant ON174001 "Dynamics of hybrid systems with complex structures. Mechanics of materials" and Faculty of Mechanical Engineering, University of Niš.

### References

- [1] Brčić V., Jovanović L., (1964) Primena modelskih ispitivanja pri rešavanju problema hidrotehničkih konstrukcija. *Reports of the Institute Jaroslav Černi* 30, pp. 17-29.
- [2] Brčić V., Nešović M., (1968) Fotoelastično ispitivanje diskontinualnih stena. *Reports of the Institute Jaroslav Černi* 44, pp. 31-49.
- [3] Ju Y. et al., (2017) Visualization of the 3D structure and stress field of aggregated concrete materials through 3D printing and frozen stress techniques. *Construction and Building Materials* 143, pp. 121-137.
- [4] Feng W. et al., (2002) Research on the effect of bedrock upon the stress of a gravity dam bulk by the photoelastic method. *J. Materials Processing Technology* 123, pp. 236-240.
- [5] Khesin G.L. et al., (1973) Research Investigation of dynamic stresses in models of hydraulic structures by the photoelastic method. *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo* 1, pp. 23-29.



- Неколико фотографија са конференције (3 фотографије)

