

## АНАЛИЗ НА МЕХАНИЧНОТО ПОВЕДЕНИЕ НА ИСТОРИЧЕСКИ ЗИДАНИ КУЛИ ПРИ НАРУШАВАНЕ НА КОНСТРУКТИВНАТА ЦЯЛОСТ

Нели Тризлова<sup>1</sup>

## ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF HISTORIC MASONRY TOWERS FOLLOWING THE LOSS OF STRUCTURAL INTEGRITY

Neli Trizlova

### Abstract:

*Historic masonry towers are highly vulnerable to differential settlement, seismic actions, material deterioration, and structural interventions that may compromise their structural integrity and alter their mechanical behavior. This study analyzes their mechanical response following the loss of structural integrity by considering damage evolution as a sequential mechanical process. The results show that, irrespective of the initiating cause, damage follows a common sequence involving changes in the spatial load-transfer path, redistribution of internal forces, and the attainment of either a new stable equilibrium or a local failure mechanism. The proposed approach is validated through three representative case studies: the Leaning Tower of Pisa, the bell tower of the Basilica of San Benedetto in Norcia, and the Ghirlandina Tower in Modena. The findings demonstrate the applicability of the proposed approach for the structural assessment and health monitoring of historic masonry towers.*

### Keywords:

*historic masonry towers; structural integrity; mechanical behavior; structural damage; load-transfer path; structural health monitoring.*

### 1. Въведение

Историческите зидани кули представляват едни от най-сложните и уязвими конструкции на архитектурното наследство поради голямата си височина, значителното собствено тегло и продължителното въздействие на природни и експлоатационни фактори. Сред факторите на околната среда съществено значение имат и температурните въздействия, които при продължително действие могат да предизвикат температурни деформации и да влияят върху поведението на строителните конструкции [13]. Диференциалните слягания на основите, земетръсните въздействия, деградацията на строителните материали и предходните конструктивни намеси могат да доведат до изменение на механичното поведение на конструкцията, развитие на пукнатини и деформации, а при неблагоприятни условия – до частично или пълно разрушаване.

<sup>1</sup> Нели Тризлова, д-р/доцент, Строителство на сгради и съоръжения, Архитектурен факултет, Варненски свободен университет „Черноризец Храбър“, к.к. „Чайка“, 9007 Варна, България, neli.trizlova@vfu.bg; Neli Trizlova, PhD/Assoc. Prof., Department of Construction of Buildings and Structures, Faculty of Architecture, Varna Free University "Chernorizets Hrabar", Chayka Resort, 9007 Varna, Bulgaria, neli.trizlova@vfu.bg.

През последните десетилетия са публикувани многобройни изследвания, посветени на обследването, мониторинга и численото моделиране на исторически зидани кули. Въпреки значителния напредък в тази област, повечето от тях разглеждат отделни конструктивни повреди или конкретни механизми на разрушение, без да предлагат общ механичен модел, който да обяснява развитието на повредите независимо от тяхната първопричина. В настоящото изследване понятието „**конструктивна цялост**“ се използва като обобщаваща механична характеристика, описваща способността на конструкцията да запази непрекъснатото пространствено пренасяне на усилията между отделните носещи елементи.

От гледна точка на строителната механика конструктивните повреди не следва да се разглеждат единствено като локални дефекти в зидарията. Те представляват проявление на изменение в пространственото пренасяне на усилията, което води до преразпределение на вътрешните сили и промяна в механичното поведение на конструкцията като единна пространствена система.

Целта на настоящото изследване е да се предложи обобщен механичен модел за анализ на нарушаването на конструктивната цялост на историческите зидани кули. Приложимостта на предложения модел е оценена чрез анализ на три реални обекта с различни първични механизми на възникване на повредите – Пизанската кула, камбанарията на базиликата „Сан Бенедето“ в Норча и кулата Ghirlandina в Модена.

## 2. Механична основа на нарушаването на конструктивната цялост

Историческите зидани кули представляват пространствени носещи системи, при които устойчивостта се осигурява чрез непрекъснатото пренасяне на усилията от върха към основите. При нормална експлоатация вътрешните сили се разпределят по определен пространствен път, формиран от геометрията на конструкцията, механичните характеристики на зидарията и условията на опирание. Запазването на този път на пренасяне на усилията е основно условие за съхраняване на конструктивната цялост [3,4,5,6,7].

Конструктивната цялост се определя като способността на носещите елементи да функционират съвместно като единна пространствена система, осигуряваща непрекъснато пренасяне на натоварванията към основите. Всяко локално нарушение на тази непрекъснатост изменя механичното поведение на конструкцията.

Причина за подобно нарушение могат да бъдат диференциални слягания, земетръсни въздействия, пукнатини, деградация на материалите или конструктивни намеси. Независимо от техния произход, те водят до изменение на първоначалния път на пренасяне на усилията и до преразпределение на вътрешните сили. Ако останалата част от конструкцията разполага с достатъчен резерв на носимоспособност, се достига ново равновесно състояние. При недостатъчен резерв се развиват локални механизми, които могат да доведат до прогресивно намаляване на конструктивната сигурност.

Следователно оценката на механичното поведение на историческите зидани кули следва да се основава не само на регистрирането на отделните повреди, а на анализа на измененията в пространственото пренасяне на усилията и тяхното влияние върху работата на конструкцията като единна система. Този принцип е в основата на предложения в настоящото изследване механичен модел.

### 3. Предложен механичен модел

Предложеният механичен модел разглежда нарушаването на конструктивната цялост на историческите зидани кули като последователен процес, чиято закономерност е независима от първопричината за възникване на повредите. Независимо дали първоначалното нарушение е предизвикано от диференциални слягания, сеизмични въздействия, деградация на строителните материали или конструктивни намеси, механичното развитие на процеса следва обща последователност.

Началният етап се характеризира с локално нарушаване на конструктивната цялост, проявяващо се чрез пукнатини, деформации или изменения в контактните зони между отделните конструктивни елементи. В тази фаза конструкцията обикновено запазва своята обща носимоспособност, но първоначалната схема на пренасяне на усилията вече е нарушена (фиг.1).



Фигура 1. Последователност на механичните процеси при нарушаване на конструктивната цялост на исторически зидани кули

Вследствие на това настъпва изменение на пространствения път на пренасяне на усилията и преразпределение на вътрешните сили. Част от конструктивните елементи се разтоварват, докато в други възникват локални концентрации на напрежения, които определят по-нататъшното развитие на процеса.

Ако останалата част от конструкцията разполага с достатъчен резерв на носимоспособност, се достига ново устойчиво равновесно състояние. При недостатъчен резерв се развиват локални механизми, които могат да доведат до прогресивно разрушаване на конструкцията.

Предложеният подход не е свързан с конкретен вид въздействие или с определен конструктивен тип. Той представлява обобщена механична схема за интерпретация на поведението на историческите зидани кули и може да бъде използван като концептуална основа при анализа на различни видове конструктивни повреди.

#### 4. Проверка на предложения механичен подход

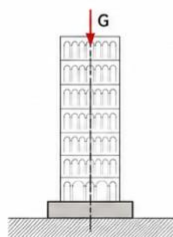
За проверка на предложения механичен подход са анализирани три исторически зидани кули, при които нарушаването на конструктивната цялост е предизвикано от различни първични въздействия. Разгледаните примери обхващат геотехническо, сеизмично и дълготрайно конструктивно въздействие, което позволява да се оцени приложимостта на подхода при различни механизми на възникване и развитие на повредите.

##### 4.1. Наклонената камбанария на катедралата в Пиза (Италия)

Наклонената камбанария на катедралата в Пиза (фиг.2) е характерен пример за геотехнически обусловено изменение на механичното поведение. Диференциалните слягания на основите водят до постепенно наклоняване на конструкцията и изменение на пространствения път на пренасяне на усилията. Значението на взаимодействието между конструкцията, земната основа и специфичните условия на терена се проявява и при разработването на инженерни решения, свързани с усвояването на подземното урбанизирано пространство [16]. В резултат настъпва преразпределение на контактните напрежения в основата, след което конструкцията достига ново устойчиво равновесно състояние вследствие на изпълнените стабилизационни мероприятия [14].

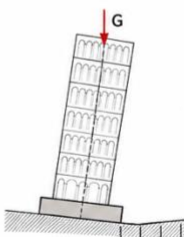
В рамките на предложения подход този случай илюстрира изменение на механичното поведение без развитие на разрушителен механизъм.

а) Първоначално вертикално положение



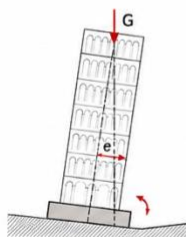
Кулата и основата са в приблизително осово натоварено състояние.

б) Диференциално слягане на основите



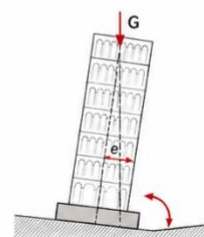
Меката почва под южната (лявата на фигурата) страна сляга повече – възниква диференциално слягане.

в) Наклоняване и нарастване на ексцентрицитета



Равнодействащата на собственото тегло се измества спрямо центъра на основата (ексцентрицитет  $e$ ). Увеличава се преобръщачият момент.

г) Опасност от прогресивна нестабилност (преобръщане)



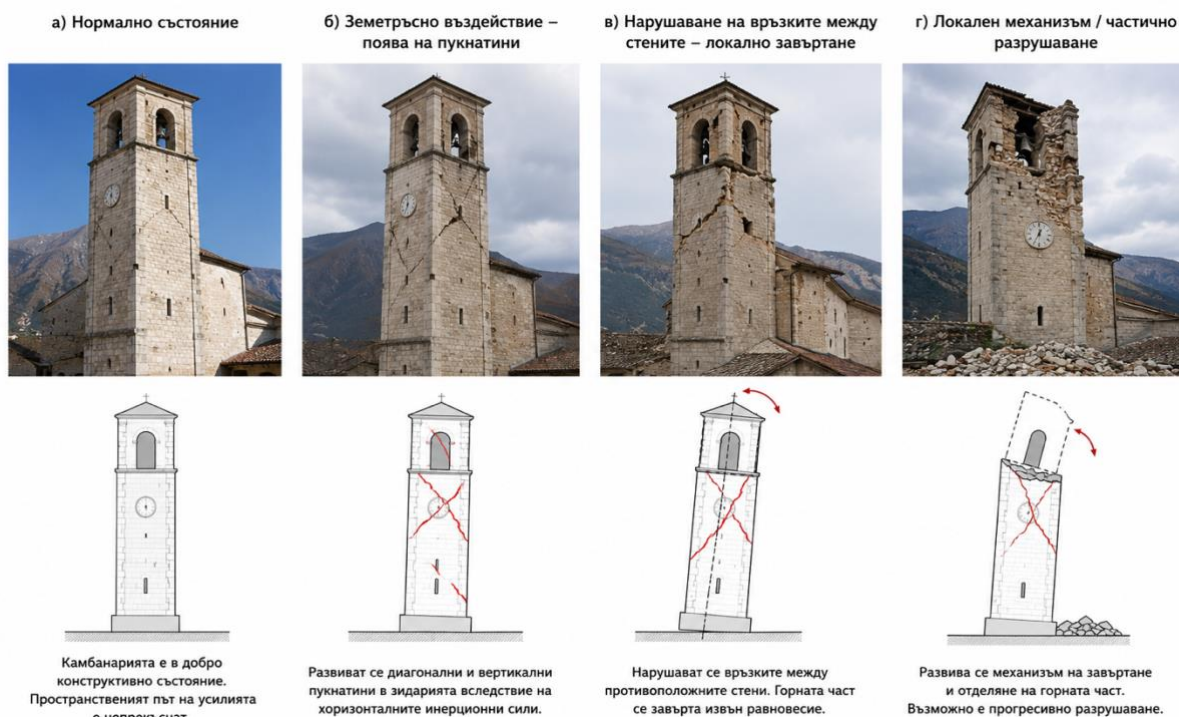
Допълнителният наклон поражда ново преразпределение на контактните напрежения и допълнително завъртане. Без стабилизация процесът може да се развива към преобръщане.

Фигура 2. Механично развитие на процеса при наклонената камбанария на катедралата в Пиза

#### 4.2. Камбанарията на базиликата „Сан Бенедето“, Норча (Италия)

Земетресението през 2016 г. причинява значителни повреди в зидарията и нарушава пространственото взаимодействие между носещите елементи на камбанарията (фиг.3). Получените пукнатини изменят пътя на пренасяне на усилията, което води до локални концентрации на напрежения. Поради недостатъчната остатъчна носимоспособност процесът завършва с развитие на локален механизъм и частично разрушаване на конструкцията [15].

Този случай демонстрира развитието на предложения механичен подход при сеизмично въздействие.



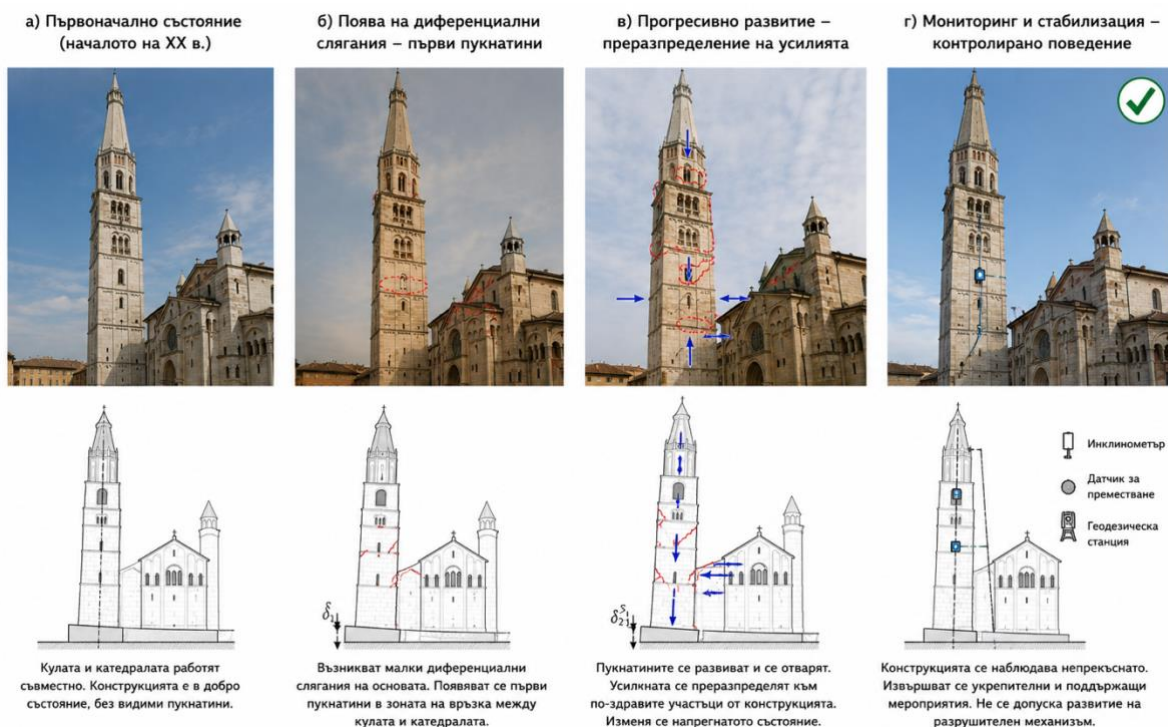
Фигура 3. Механично развитие на процеса при камбанарията на базиликата „Сан Бенедето“ при земетръсно въздействие (2016г.)

#### 4.3. Кулата Ghirlandina, Модена (Италия)

Кулата Ghirlandina е пример за дълготрайно изменение на механичното поведение вследствие на локални деформации, конструктивни изменения и взаимодействието с прилежащата катедрала (фиг.4). Продължителният структурен мониторинг позволява своевременно установяване на настъпващите изменения и предприемане на инженерни мерки, благодарение на които не се достига до развитие на разрушителен механизъм и конструкцията запазва своята носимоспособност [10, 11, 12].

Този пример показва приложимостта на предложения подход при интерпретацията на резултатите от структурния мониторинг и оценката на риска.

Наблюдаваното поведение потвърждава, че дори при наличие на локални деформации и промени в конструктивната система историческите зидани кули могат да достигнат ново устойчиво равновесно състояние, когато изменението на пътя на пренасяне на усилията не води до превишаване на носимоспособността на отделните елементи. В този смисъл структурният мониторинг не само регистрира развитието на деформациите, но и предоставя информация за оценка на механичното състояние на конструкцията и за прогнозиране на риска от преминаване към локален механизъм.



Фигура 4. Развитие на конструктивните повреди при кулата Ghirlandina вследствие на диференциални слягания и дълготрайно взаимодействие с катедралата

#### 4.4. Потвърждаване на предложения механичен подход

Анализът на трите исторически зидани кули показва, че независимо от различния характер на първоначалното въздействие развитието на конструктивните повреди следва обща механична последователност. Във всички разгледани случаи локалното нарушаване на конструктивната цялост води до изменение на пространствения път на пренасяне на усилията и последващо преразпределение на вътрешните сили. По-нататъшното развитие на процеса се определя от наличния резерв на носимоспособност на конструкцията. При достатъчен резерв се достига ново устойчиво равновесно състояние, а при недостатъчен се развиват локални механизми, които могат да доведат до частично или пълно разрушаване.

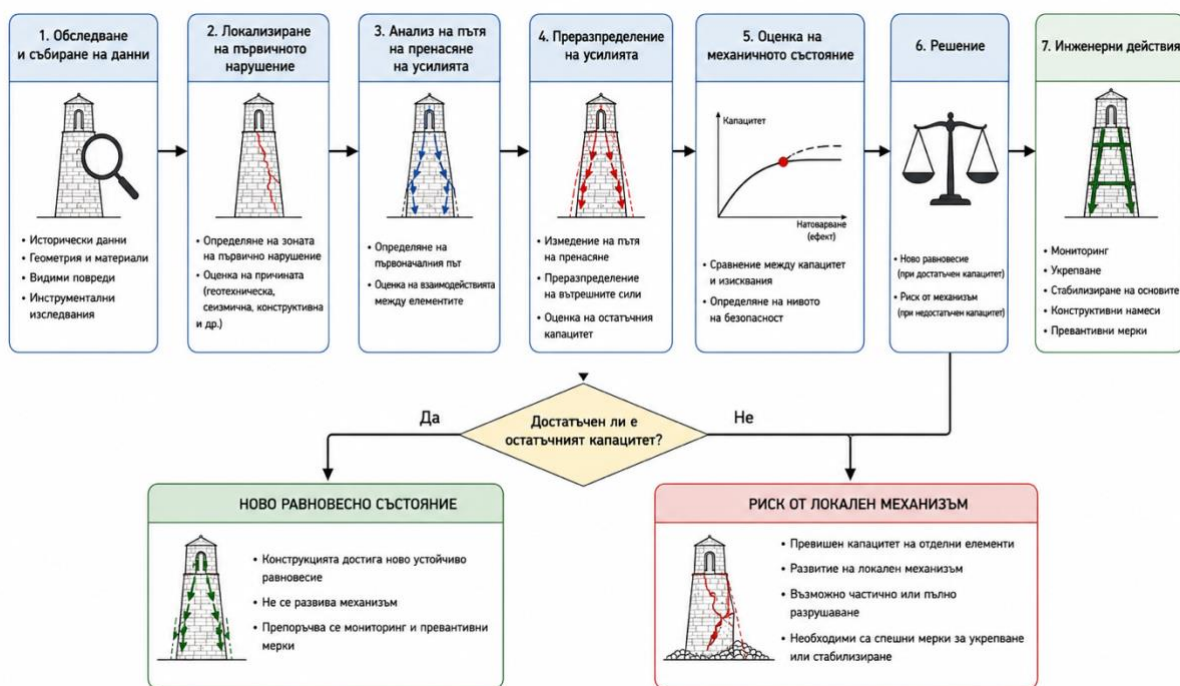
Получените резултати потвърждават, че предложеният механичен модел е приложим при различни видове първични въздействия и позволява механично обяснение на развитието на конструктивните повреди независимо от тяхната първопричина.

#### 5. Практическо значение на предложения подход

Предложеният механичен подход може да бъде използван като концептуална основа при инженерното обследване и оценката на исторически зидани кули [1,2,5,8,9]. За разлика от подходите, основани единствено на регистриране на видимите повреди, той позволява те да бъдат интерпретирани като резултат от изменение на пространствения път на пренасяне на усилията и последващото преразпределение на вътрешните сили (фиг.5).

Този подход създава възможност още в началните етапи на обследването да се оцени дали конструкцията е достигнала ново устойчиво равновесно състояние или съществуват предпоставки за развитие на локален механизъм. По този начин подходът подпомага избора на подходящи инженерни решения, свързани с мониторинг, укрепване или стабилизиране на конструкцията.

Предложеният подход не заменя експерименталните изследвания, структурния мониторинг или численото моделиране, а ги допълва чрез единна механична интерпретация на наблюдаваните процеси. Поради своята обобщена концептуална основа той може да бъде прилаган при анализа на различни видове исторически зидани кули.



Фигура 5. Инженерна последователност за оценка и управление на конструктивната цялост на исторически зидани кули

## 6. Заключение

Проведеното изследване показва, че независимо от различния характер на първоначалните въздействия развитието на конструктивните повреди при историческите зидани кули следва обща механична последователност. Локалното нарушаване на конструктивната цялост води до изменение на пространствения път на пренасяне на усилията и последващо преразпределение на вътрешните сили, което определя по-нататъшното механично поведение на конструкцията. В зависимост от наличния резерв на

носимоспособност процесът завършва с достигане на ново устойчиво равновесно състояние или с развитие на локален механизъм.

Проверката на предложения механичен подход чрез анализ на Наклонената камбанария на катедралата в Пиза, камбанарията на базиликата „Сан Бенедето“ в Норча и кулата Ghirlandina потвърждава неговата приложимост при различни механизми на възникване на конструктивните повреди. Независимо от различната първопричина, механичното развитие на процеса се подчинява на едни и същи закономерности.

Предложеният подход може да бъде използван като концептуална основа при инженерното обследване, структурния мониторинг и оценката на исторически зидани кули. Той не заменя експерименталните изследвания и численото моделиране, а ги допълва чрез единна механична интерпретация на развитието на конструктивните повреди.

### Основни приноси

- Предложен е обобщен механичен подход за анализ на нарушаването на конструктивната цялост на историческите зидани кули.
- Доказано е, че различни първични въздействия могат да бъдат интерпретирани чрез единна механична последователност, основана на изменение на пространствения път на пренасяне на усилията и преразпределение на вътрешните сили.
- Приложимостта на подхода е потвърдена чрез анализ на три реални исторически обекта с различни механизми на възникване на конструктивните повреди и е показан неговият потенциал за практическо приложение при инженерната оценка на исторически зидани кули.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. ICOMOS. *Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*. Proceedings of the 14th General Assembly and Scientific Symposium, Victoria Falls, Zimbabwe, 2003.
2. CEN. *EN 17440:2020. Conservation of Cultural Heritage – Guidelines for Condition Survey and Reporting of Built Cultural Heritage*.
3. Heyman, J. *The Stone Skeleton. International Journal of Solids and Structures*, 2(2), 249–279, 1966.
4. Heyman, J. *The Masonry Arch*. Ellis Horwood, Chichester, 1982.
5. Binda, L., Saisi, A., Tiraboschi, C. *Investigation Procedures for the Diagnosis of Historic Masonries. Construction and Building Materials*, 14(4), 199–233, 2000.
6. Lourenço, P. B. *Computations on Historic Masonry Structures. Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 301–319, 2002.
7. Como, M. *Statics of Historic Masonry Constructions*. Springer International Publishing, 2017.
8. Ramos, L. F., Marques, L., Lourenço, P. B., De Roeck, G., Campos-Costa, A., Roque, J. *Monitoring Historical Masonry Structures with Operational Modal Analysis: Two Case Studies. Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), 1291–1305, 2010.
9. Masciotta, M. G., Ramos, L. F., Lourenço, P. B. *The Importance of Structural Monitoring as a Diagnosis and Control Tool in the Restoration Process of Heritage Structures: A Case Study in Portugal. Journal of Cultural Heritage*, 27, 36–47, 2017.

10. Castagnetti, C., Bertacchini, E., Capra, A. *Monitoring Leaning Towers by Geodetic Approaches: Effects of Subsidence and Earthquake to the Ghirlandina Tower. Structural Control and Health Monitoring*, 23(3), 580–593, 2016. DOI: 10.1002/stc.1799.
11. Lancellotta, R., Sabia, D. *Identification Technique for Soil–Structure Analysis of the Ghirlandina Tower. International Journal of Architectural Heritage*, 9(4), 391–407, 2015.
12. Sabia, D., Demarie, G. V., Quattrone, A. *Structural Health Monitoring of Historic Masonry Towers: The Case of the Ghirlandina Tower, Modena. In: Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III. CRC Press*, 2022, pp. 191–201. DOI: 10.1201/9781003329756-10.
13. Ениманев И., Стратегии за смекчаване влиянието на топлинните въздействия в градска среда. Съвременният свят – постижения, рискове, иновации, Сборник с доклади от международна научна конференция, Русе, 23–25 април 2024, т. 2, с. 428–438, 2024.
14. Burland, J. B., Jamiolkowski, M., Viggiani, C. *Leaning Tower of Pisa: Behaviour after Stabilization Operations. International Journal of Geoengineering Case Histories*, Vol. 1, Issue 3, 2009, pp. 156–169.
15. Pagan, K., Cescatti, E., Causarano, M.-A., Valluzzi, M. R., Liu, Y. *The Basilica of San Benedetto in Norcia: How Seismic Events Influenced Its History. In: El Mundo de las Catedrales. Pasado, presente y futuro, Fundación VIII Centenario de la Catedral, Burgos*, 2022, pp. 1421–1430. ISBN 978-84-09-41429-1.
16. Ениманев И., Ениманев К. *Формиране на подземно урбанизирано пространство в Русенски регион. Международна научна конференция „Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, 15–17 септември 2016 г., Варна, България, с. 528–532.*