



Получена: 07.05.2021 г.

Приета: 21.05.2021 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА НЕЛИНЕЕН АНАЛИЗ GMNIA ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕДНА НЕСТАНДАРТНА СТОМАНЕНА КОНСТРУКЦИЯ

Н. Рангелов¹, Д. Динев², Г. Радославов³

Ключови думи: нестандартна стоманена конструкция, устойчивост, GMNIA, CFD

РЕЗЮМЕ

Обичайната проектантска практика предполага статическо решение за различни товарни състояния и комбинации, и проверки на отделните конструктивни елементи (напречни сечения и елементи). Но има случаи, при които този традиционен подход се оказва неприложим поради това, че не е възможно да се идентифицират отделни елементи, към които да се приложат съответните проверки на устойчивост. Такъв е случаят със стоманената конструкция на перголите на площад „Славейков“ в София. В доклада се представя конструктивното изследване на модулна пергола, извършено от авторите по възлагане от Столична община, предназначено да провери и докаже сигурността на стоманената конструкция при различни случаи и при допълнително окачени към нея „библиотеки“ за книги. За доказване на устойчивостта на конструкцията е приложен пълен геометрично и материално нелинеен анализ с отчитане на началните несъвършенства (GMNIA) по метода на крайните елементи. Поради сложната и нестандартна форма на съоръжението, за оценка на ветровото въздействие е извършено изследване чрез изчислителната динамика на флуидите (CFD), но е приложено и приблизително определено натоварване от вятър при доста по-консервативни предпоставки. Накрая резултатите са обобщени в изводи и препоръки.

¹ Николай Рангелов, проф. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: rangelov_fce@uacg.bg.

² Добромир Динев, доц. д-р инж., кат. „Строителна механика“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ddinev_fce@uacg.bg.

³ Георги Радославов, гл. ас. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: radosl_fce@uacg.bg.

1. Въведение

Обичайната проектантска практика предполага статическо решение за различни товарни състояния и комбинации, и проверки на отделните конструктивни елементи (носимоспособност на напречните сечения и устойчивост на елементите) [1]. При стоманените конструкции ключови за носимоспособността са различните потенциални форми на загуба на устойчивост. Оказва се, че има случаи, при които този традиционен подход се явява неприложим поради това, че не е възможно да се идентифицират отделни елементи, към които да се приложат съответните проверки на устойчивост.

Такъв е случаят със стоманената конструкция на перголите на площад „Славейков“ в София. В доклада се представя конструктивното изследване на модулна пергола, извършено от авторите по възлагане от Столична община, предназначено да провери и докаже сигурността на стоманената конструкция при различни проектни ситуации, както и при допълнително окачени към нея „библиотеки“ за книги, а именно:

- 1) Пергола без покритие, т.е. без възможност за задържане на сняг.
- 2) Пергола без покритие, с допълнително окачена „библиотека“ (оценка на сигурността при отворено и затворено положение на двете крила на „библиотеката“).
- 3) Пергола с покритие от закалено стъкло с дебелина 12 mm, захванато чрез точков монтаж чрез метални присъединителни планки и неръждаеми шарнирни точкови крепежи (без възможност за взаимодействие с опорните стоманени ребра).
- 4) Добавяне на допълнително окачена „библиотека“ и анализ при отворено и затворено положение.

За доказване на устойчивостта на конструкцията е приложен пълен геометрично и материално нелинеен анализ с отчитане на началните несъвършенства (GMNIA) по метода на крайните елементи. За по-голяма достоверност на резултатите са използвани два различни софтуерни продукта и съответно са проведени независими паралелни анализи за различните проектни ситуации и товарни комбинации. Поради сложната и нестандартна форма на съоръжението, за оценка на ветровото въздействие е извършено изследване чрез изчислителната динамика на флуидите, но е приложено и приблизително определено натоварване от вятър при доста по-консервативни предпоставки.

2. Основна информация за конструкцията. Коментар

Обект на изследването е типова стоманена пергола с височина 4,65 m. Нейната стоманена конструкция е подчинена на съответно архитектурно-дизайнерско решение. Тя е композирана от подходящо свързани помежду си пет стоманени ребра с правоъгълно напречно сечение и криволинейно очертание. Сечението на реброто е 300×30, като в края на хоризонталния участък горе то се скосява до 150×30. Налице са и допълнителни ребра също от стоманени шини, повечето от които нямат носещи функции. Стоманената конструкция е запъната към фундамента чрез опорна плоча с дебелина 20 mm и 10 броя анкерни болтове M20–8.8, обединени в обща анкерна група. Всяка пергола е фундирана чрез отделен правоъгълен фундамент с размери на основната плоскост 2,40×1,60 m.

Както вече бе споменато, конструкцията очевидно е изцяло подчинена на архитектурно-дизайнерското решение, т.е. едва ли са отчитани чисто конструктивни аргументи при нейното концептуално проектиране. Когато няма допълнително покритие, стоманената конструкция е просто пергола, носеща само себе си, и на пръв поглед изглежда, че няма проблем. Когато обаче се добави покритие, съоръжението на практика става навес, при който натоварването от сняг е много съществено. В този контекст, разг-

леждането на перголата като сериозно натоварена конструкция поражда опасенията, чисто композиционно, че нейната коравина на усукване е твърде малка, тъй като петте ребра се събират доста близо едно до друго, а и самите те са с напречно сечение с малка усуквателна коравина. И наистина, проведените изследвания показват, че както формите на загуба на устойчивост, така и формите на свободни трептения са преимуществено усуквателни.

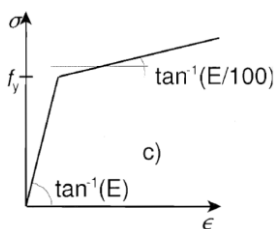
3. Методика на изследването

Относително сложната и нестандартна конструктивна форма на перголата прави невъзможно прилагането на обичайните методики за проектиране на стоманени конструкции като съставени от отделни конструктивни елементи, така както преимуществено се разглеждат в [2]. Най-сложен проблем се оказва доказването на устойчивостта на конструкцията.

В рамките на нормативната база и в частност на БДС EN 1993 единствено целесъобразно се оказва прилагането на пълен геометрично и материално нелинеен анализ с отчитане на началните несъвършенства (GMNIA) по метода на крайните елементи (МКЕ). В последните години авторите са натрупали значителен опит в прилагането на този метод [3 ÷ 5].

Прилагането на GMNIA е регламентирано от Приложение С на БДС EN 1993-1-5 [6]. Съгласно Таблица С.1 от цитираното приложение, за оценка на носимоспособността в крайно гранично състояние се прилага изследване с отчитане на нелинейно поведение на материала, геометрична нелинейност (големи премествания) и отчитане на началните несъвършенства. Началните несъвършенства се разглеждат като еквивалентни геометрични несъвършенства (отклонения от идеалната геометрия). Както се препоръчва в точка С.5, тяхната форма се приема в съответствие с първата критична форма, подходящо мащабирана. Поради „нестандартната“ геометрия не може да се приложи конкретно указание, затова амплитудата на началните несъвършенства е приета 10 mm.

Поведението на материала е разгледано като еластично-пластично с линейно уякчаване (фиг. 1).



Фиг. 1. Прието поведение на материала: еластично-пластично с линейно уякчаване

При такова изследване е важно приемането на критерий за крайно гранично състояние. Съгласно точка С.8 от Приложение С на [6] при конструкции, податливи на загуба на устойчивост, като такъв се приема достигането на максималното натоварване за разглежданата изчислителна комбинация. Тогава, съгласно С.9 от същото приложение, проверката на носимоспособност се представя чрез множителя за увеличаване на изчислителното натоварване до достигане на крайно гранично състояние α_u във вида:

$$\alpha_u \geq \alpha_1 \alpha_2, \quad (1)$$

където α_1 отчита несигурността на използвания модел по МКЕ, а α_2 е частен коефициент на сигурност, който може да се приеме равен на γ_{M1} . За нуждите на представеното изследване по експертна оценка горният критерий е обобщен като:

$$\alpha_u \geq 1,1. \quad (2)$$

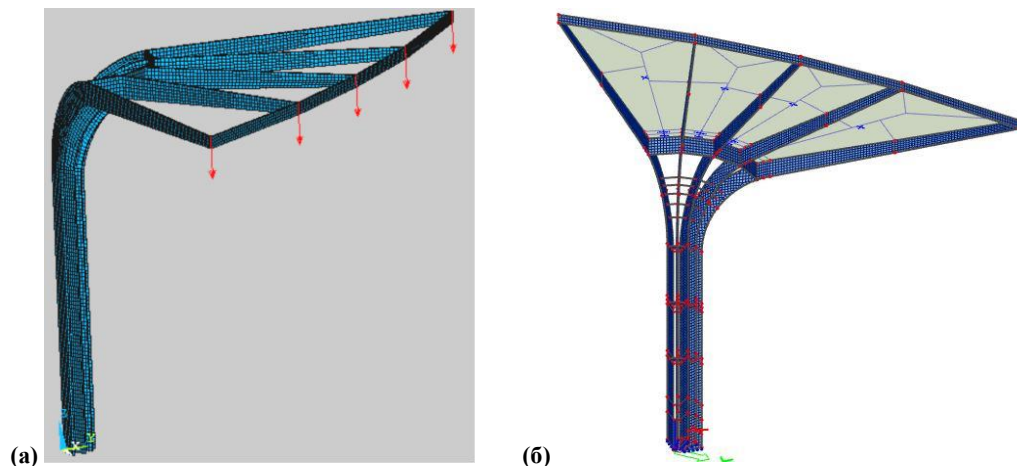
Следователно, в рамките на този критерий за всяка разглеждана проектна ситуация и съответна изчислителна комбинация на натоварвания е необходимо определянето на α_u , което се идентифицира чрез точката, след която започва разтоварване на системата, т.е. падащ клон на зависимостта „натоварване – характерно преместване“.

Когато при съответно разглежданата товарна комбинация не се достига до загуба на устойчивост, тогава съгласно същата точка С.8 (1) критерият за крайно гранично състояние се приема като „достигане на гранична стойност на главната мембранна относителна деформация“. Тази гранична стойност съгласно т. NA.2.13 от Националното приложение БДС EN 1993-1-5: 2007 /NA: 2010 [7] е приета 5%.

На практика, за окончателното решаване на задачата за всяка конкретна товарна комбинация са необходими следните изчислителни стъпки: линейно решение (за проверка на модела и начална информация относно напрегнатото състояние), анализ на устойчивостта в Ойлерова постановка, дефиниране на формата на началните несъвършенства и окончателен двойно-нелинеен (GMNIA) анализ. От него се определя носимоспособността в крайно гранично състояние, по един от двата критерия, в зависимост от това дали е установена загуба на устойчивост или не.

4. Изчислителни модели

Разработените изчислителни модели за изследване по МКЕ са основани на равнинни (черупкови) крайни елементи. Моделирани са само реално носещите елементи.



Фиг. 2. Изчислителни модели с мрежа от крайни елементи за изследване (а) с ANSYS и (б) със SCIA Engineer

Теоретично нелинейното изследване GMNIA се основава на решаване на системи от частни диференциални уравнения, за които в математиката няма теорема за съще-

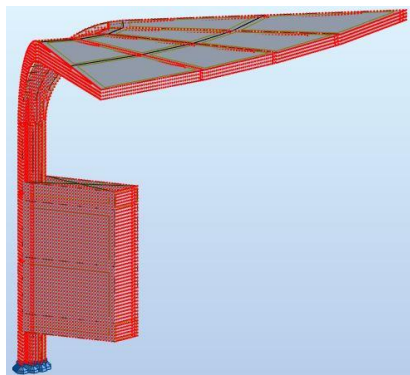
ствуване и единственост на решението. По тази причина и за по-голяма достоверност на резултатите са използвани два различни софтуерни продукта, ANSYS и SCIA Engineer, и съответно са провеждани независими паралелни анализи за различните разглеждани проектни ситуации и товарни комбинации. Дискретизацията на отделни крайни елементи оказва влияние върху точността на решението. Затова е направена предварителна оценка на влиянието ѝ. След анализ на резултатите окончателно е приета една разумна и достатъчно точна крайно-елементна дискретизация. Съответните окончателно приети изчислителни модели са представени на фиг. 2.

Въздействията върху конструкцията от постоянни товари и сняг са определени съгласно съответните части на БДС EN 1991. Но съоръжението е със сложна и нестандартна форма, поради което не е възможно директното прилагане на схемите за натоварване от вятър от БДС EN 1991-1-4. Затова първо е извършено контролно изследване чрез изчислителна динамика на флуидите (CFD). След това е приложено и приблизително определено натоварване от вятър при доста консервативни предположения.

Разглеждат се две състояния на натоварване: едното по направление на перголата (успоредно на средното ребро) и другото – в перпендикулярно направление, пораждащо най-голямо усукване. Натоварването от вятър по вертикалния участък на перголата и при двете товарни състояния се определя по метода на проектираната площ. Върху кривите и върху хоризонталните участъци натоварването се прилага като налягания върху съответните повърхности, като се коригира геометрично в зависимост от ъгъла на повърхността спрямо разглежданата посока на вятъра. За случая с „библиотеки“ се отчита и натоварването от вятър върху тях при двата случая – отворени и затворени. Сравнението с резултатите от изследването по методите на изчислителната механика на флуидите показва, че така определеното натоварване от вятър е доста консервативно, но в полза на сигурността именно то е включено в комбинациите за крайни гранични състояния.

5. Изследване за ветрово въздействие чрез изчислителна динамика на флуидите (CFD)

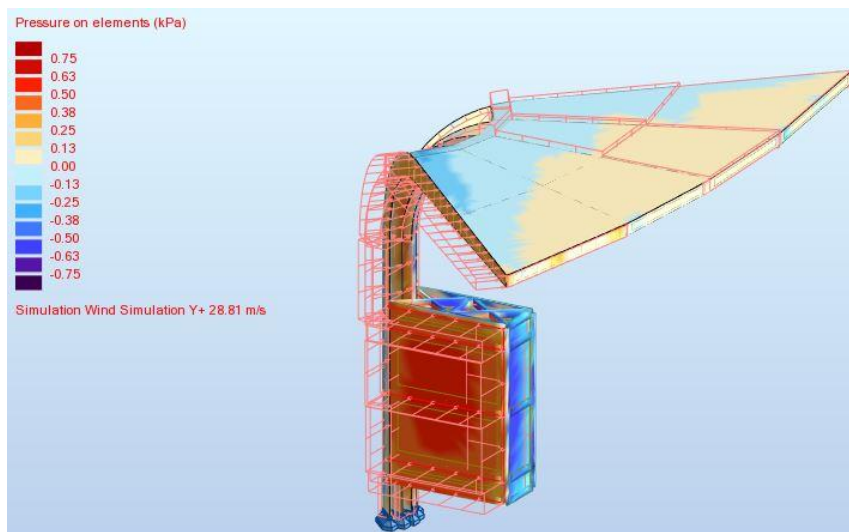
Изследването е проведено от втория автор, като е разработен изчислителен модел с добавените библиотечни конструкции (фиг. 3). Изследвано е товарно състояние в направление, напречно на средното ребро на конструкцията. Симулацията е извършена с програмната система Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2018.



Фиг. 3. Изчислителен модел с мрежа от крайни елементи за изследване за ветрово въздействие чрез CFD

Извършена е симулация на аеродинамично изпитване във ветрови тунел. Използван е модел “Large Eddy Simulation” за симулиране на турбулентния поток. Този модел сполучливо възпроизвежда средната скорост и промяната на пулсациите на вятъра. На база на тази симулация е получено еквивалентно въздействие от вятър, представено като напречно на повърхнините на конструктивните елементи налягане (фиг. 4).

Съответно от симулацията са получени премествания и напрежения. Например максималното получено преместване от вятър е 58 mm.



Фиг. 4. Еквивалентно налягане върху конструктивните елементи при скорост на въздуха 28,81 m/s или налягане 0,5 kPa

Изследването чрез CFD показва, че приблизително определените натоварвания от вятър са в полза на сигурността. Получените резултати от компютърната симулация показват и незначително увеличаване на преместванията и напреженията при наличие на библиотеки. Ниското им разположение, близо до фундамента, не оказва голямо влияние върху поведението на конструкцията.

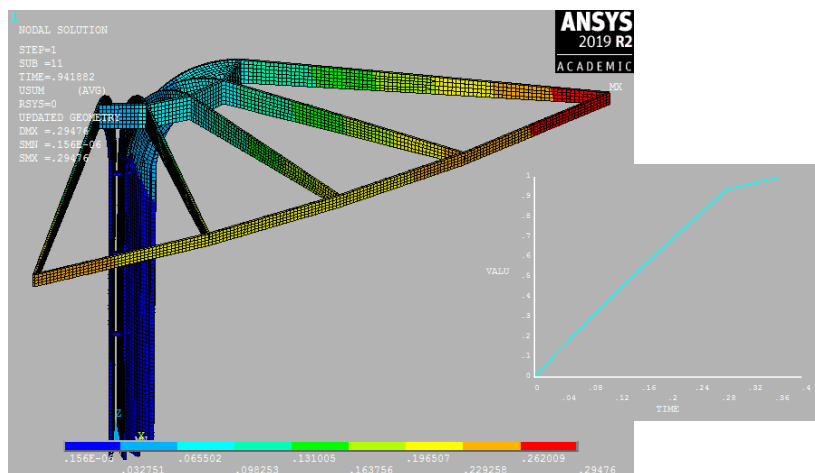
6. Конструктивно изследване и резултати

Паралелно с двата софтуерни продукта са проведени GMNIA анализи за всички възможни проектни ситуации, в това число и сеизмична. При случаите на пергола със стъклоно покритие меродавни се оказват комбинации с водещо променливо въздействие от сняг и съпътстващо въздействие от вятър. Когато вятърът е насочен успоредно на перголата, меродавен е случаят с отворени библиотеки, а когато е перпендикулярен на перголата, меродавен е случаят със затворени библиотеки. Аналогични са меродавните случаи при перголи без покритие, като тогава ветровото въздействие става водещо.

Тук са обобщени някои получени резултати.

При пергола със стъклоно покритие най-неблагоприятната ситуация се оказва, когато е натрупал сняг, който товари съществено конструкцията, и едновременно духа вятър в напречно направление, който поражда усуквателна деформация, подобна на първата форма на загуба на устойчивост.

Интересно е, че за тази комбинация резултатите, получени със SCIA показват твърде големи премествания, но не индикират гранично състояние. Но резултатите от ANSYS показват признаци на загуба на устойчивост в нелинейна постановка (фиг. 5).



Фиг. 5. Резултати от изследването с ANSYS: премествания при приложени 94% от натоварването и зависимост сила–преместване за възел от върха на конзолата

Наистина, полученият резултат може да се счита и приемлив, тъй като, първо, това се случва при 94% от изчислителното натоварване, т.е. почти пълния товар и второ, поради значително завишеното натоварване от вятър в сравнение с резултатите, получени чрез CFD. Независимо от това, поради възникващото съмнение не бе препоръчано вземане на окончателно решение за покриване на перголите.

При пергола без покритие, но с библиотеки, са разгледани два случая: отворени библиотеки с вятър надлъжно на перголата (за да се провери влиянието на значителната обветрена площ) и затворени библиотеки с вятър напречно, когато ще товари максимално библиотеките и ще поражда усукване. И в двата случая и двете групи GMNIA анализи (с ANSYS и със SCIA) показват, че конструкцията е в състояние да понесе допълнителния товар. Очевидно това се обуславя от ниското разположение на библиотеките, което не влияе съществено върху устойчивостта на перголата, съчетано с липсата на натоварване от сняг.

Сеизмичният анализ е извършен за възможно най-неблагоприятния случай. Добавянето на библиотеките със значителна маса не се оказва фатално, защото те са разположени ниско. Получават се обаче твърде големи премествания, което се дължи на малката усуквателна коравина на конструкцията и наличието на маса на покрива (от 30% сняг). При липса на натоварване от сняг подобен проблем не възниква.

7. Заключение изводи

По възлагане от Столична община са извършени подробни конструктивни изследвания на стоманени модулни перголи, разположени на площад „Славейков“. Изследванията са предназначени да проверят и докажат сигурността на стоманената конструкция при различни проектни ситуации и при допълнително окачени към нея „библиотеки“ за книги.

Поради нестандартната конструктивна форма на съоръжението, не е възможно да се идентифицират отделни конструктивни елементи, към които да се приложат известните методики от [2]. Ето защо, за доказване на устойчивостта на конструкцията е приложен пълен геометрично и материално нелинеен анализ с отчитане на начални несъвършенства (GMNIA) по метода на крайните елементи. За по-голяма достоверност и сигурност на резултатите са използвани два различни софтуерни продукта и съответно са проведени независими паралелни анализи за различните проектни ситуации и товарни комбинации. Поради сложната и нестандартна форма на съоръжението, за оценка на ветровото въздействие е извършено и изследване чрез изчислителната динамика на флюидите (CFD).

Получените резултати от анализите могат да се обобщят така:

- При случая на пергола с покритие съчетанието от натрупал сняг и вятър в напречно направление води до съмнения по отношение на конструктивната надеждност на съоръжението. Затова бе препоръчано да не се монтира каквото и да било покритие, което би позволило натрупване на сняг.
- Когато няма покритие и възможност за натрупване на сняг, сигурността на конструкцията се оказва напълно достатъчна, в това число и при монтирани библиотеки. Тяхното влияние върху конструкцията въпреки значителното им тегло се оказва не толкова съществено, тъй като са разположени ниско, близо до основата на ствола.
- Теглото на библиотеките, ако такива се монтират, би било дори благоприятно както за базата на съоръжението, така и за фундамента, тъй като се добавя значителен натиск.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gardner, L., Fieber, A., Macorini, L. Structural steel design by advanced analysis with strain limits. Proceedings of *Stability and Ductility of Steel Structures 2019* (ed. by F. Wald & M. Jandera), CRC Press / Balkema, Taylor & Francis Group, 2019, pp. 3-15.
2. BDS EN 1993-1-1: 2005. Proektirane na stomaneni konstruktсии. Chast 1.1: Obshti pravila i pravila za sgradi. CEN, 2005.
3. Radoslavov, G. Study of steel tapered members. PhD Thesis, UACEG, Sofia, 2015 (in Bulgarian).
4. Vassilev, M., Rangelov, N. Aspects of stability of steel single-storey portal frames (Part 1 and Part 2). Annual of UACEG, vol. L, Sofia, 2017 (in Bulgarian).
5. Vassilev, M., Rangelov, N. Study on the out-of-plane stability of steel portal frames, Proceedings of *Stability and Ductility of Steel Structures 2019* (ed. by F. Wald & M. Jandera), CRC Press / Balkema, Taylor & Francis Group, 2019, pp. 1201-1209.
6. BDS EN 1993-1-5: 2007. Proektirane na stomaneni konstruktсии. Chast 1.5: Palnostenni konstruktivni elementi. CEN, 2007.
7. BDS EN 1993-1-5: 2007/NA:2011. Proektirane na stomaneni konstruktсии. Chast 1.5: Palnostenni konstruktivni elementi. Natsionalno prilozhenie (NA), BIS, 2011.

APPLICATION OF NONLINEAR ANALYSIS GMNIA FOR ASSESSMENT OF AN IRREGULAR STEEL STRUCTURE

N. Rangelov¹, D. Dinev², G. Radoslavov³

Keywords: irregular steel structure, stability, GMNIA, CFD

ABSTRACT

The traditional design practice involves two steps: a structural analysis for different design situations and relevant combinations, and then design checks to verify the resistance and stability of the individual structural members. However, there are situations when this traditional approach cannot be applied because individual members cannot be identified, and the relevant stability verifications cannot directly be performed. Such is the case of the steel pergolas in *Slaveykov Square* in Sofia. In this paper, the structural assessment analysis is reported for a module structure of a pergola, carried out by the authors under assignment by the Municipality of Sofia. The study is aimed at verifying and proving the safety of the steel structure for various design situation, including with additionally attached large bookshelf units. To prove the stability of the structure, geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections included (GMNIA) is applied using the finite element method. Due to the irregular shape of the structure, the wind actions are estimated by analysis based on CFD, together with wind loads obtained approximately based on more conservative assumptions. Finally, the obtained results are summarised, and relevant recommendations are formulated.

¹ Nikolay Rangelov, Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: rangelov_fce@uacg.bg.

² Dobromir Dinev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Structural Mechanics”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: ddinev_fce@uacg.bg.

³ Georgi Radoslavov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: radosl_fce@uacg.bg.