



Получена: 14.05.2021 г.

Приета: 16.08.2021 г.

## АНАЛИЗ НА СТОМАНО-СТОМАНОБЕТОННИ КОМБИНИРАНИ ЕЛЕМЕНТИ ПРИ ДЪГОВИ КОНСТРУКЦИИ

А. Жипонов<sup>1</sup>, В. Николов<sup>2</sup>, Д. Димитров<sup>3</sup>, М. Трайкова<sup>4</sup>

*Ключови думи: комбинирани конструкции, дъги, МКЕ, устойчивост*

### РЕЗЮМЕ

Разработката цели обогатяване на познанията за поведението на рядко срещани конструктивни решения с оглед на нарастващата им популярност. Представените типични дъгови мостови елементи са анализирани на натоварване извън равнината си. Изготвена е серия от анализи, съпоставящи различни напречни сечения и ъгли на натоварване на елемента. За анализа и съпоставката на носимоспособността на огъване и устойчивост са използвани идеализирани модели по МКЕ, отчитащи геометрична и материална нелинейност.

### 1. Въведение

Дъговите конструкции обикновено предлагат икономично и елегантно решение за преместване на големи отвори. С нарастването на техническите и производствените възможности за изпълнение на основните мостови елементи прилагането на неукрепени (свободно стоящи) дъгови елементи става срещано явление. Липсата на укрепителни

---

<sup>1</sup> Александър Жипонов, гл. ас. д-р инж., кат. „Пътища и транспортни съоръжения”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ajiponov\_fte@uacg.bg

<sup>2</sup> Васил Николов, инж., кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: v.tz.nikolov@gmail.com

<sup>3</sup> Димитър Димитров, доц. д-р инж., кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: dim1959sk@abv.bg

<sup>4</sup> Марина Трайкова, проф. д-р инж., кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: marina5261@abv.bg

елементи в напречно направление на носещи дъгови конструкции води до риск от загуба на устойчивост извън равнината на дъгата.

Поведението на бетона при натиск води до значителен принос към носимоспособността на сечението. Същевременно масивната геометрия на бетонните сечения е в полза при проблемите, които са свързани с устойчивостта. При адекватно конструиране на комбинираното сечение конструкционната стомана може да се използва като:

- кофраж;
- защитен кожух;
- елемент за постигане на „ограничен бетон“.

Конструкционната стомана дава принос към носимоспособността и коравината както на огъване, така и на усукване. Това е особено важно при дъгови елементи, които са натоварени извън равнината си.

Комбинираните дъгови елементи се отличават с улеснени строителни дейности по транспортиране, кофриране, монтаж и детайлиране. Коректното използване на подобни комбинирани решения за конкретни случаи може да оптимизира разходите по изграждане на дъгови мостови съоръжения.

В настоящата тема е представена серия от анализи на базата на „Метода на Крайните Елементи“ (МКЕ) за изследване на поведението при наличие на товар извън равнината на дъгата. В проведените анализи е заложена геометрична и материална нелинейност за получаване на максимално точни резултати. Крайната цел е получаването на серия от криви за всяко решение при приетите ъгли на натоварване спрямо равнината на дъгата. Всяка от кривите изразява зависимостта между външното натоварване и деформациите в моделите. Получената „фамилия“ криви може да се използва за определяне на точката на „бифуркация“ (загуба на устойчивост), а оттам и за определянето на критичния товар, при който дъговият елемент губи устойчивост.

## 2. Аналитична постановка

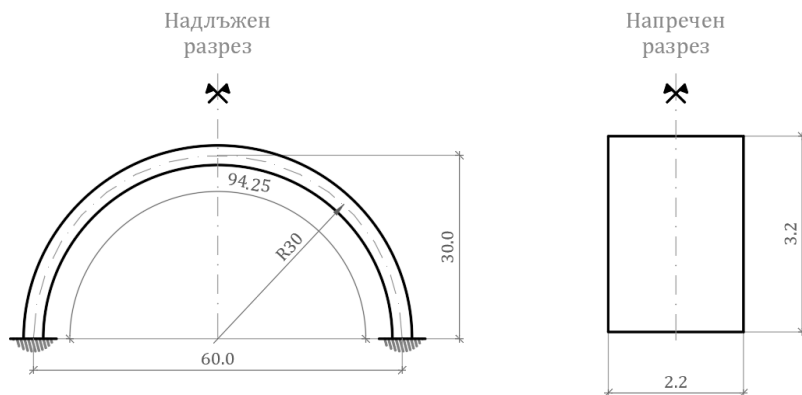
В рамките на представената тема е разгледана поредица от напречни сечения на носеща дъгова конструкция с идентична геометрия. Всяка от представените постановки се различава единствено по параметрите на напречното сечение. Геометрията е подбрана на базата на съвременния опит и практика, който се прилага при конструирането на дъгови конструкции в последните десетилетия. Основните геометрични параметри, които са подбрани за сравнителния анализ, представляват описана по окръжност носеща дъгова конструкция. Всички подбрани за анализа сечения имат различни параметри на инерционните характеристики, носимоспособността и собственото тегло. Контролният параметър, който служи за ограничение на разглежданите сечения, е геометричният контур, в който те могат да се впишат. Геометрията на напречните сечения е заимствана от характерни дъгови конструкции. За определяне на основните форми на сечението е избран мостът „Jiubao Bridge“ (Китай). За част от сеченията са представени алтернативи от комбинирани стомано-стоманобетонни сечения – вж. т. 2.2.

Избраните сечения са конструирани спрямо конструктивните изисквания и препоръки за натиснати комбинирани елементи в [3].

Опорните условия на дъгата са приети като „пълно запъване“ за редуциране на параметрите на проведените анализи.

## 2.1. Геометрична постановка

Формата на дъгата е полуокръжност с радиус 30 m. Подпорното разстояние е 60 m, а стрелката на дъгата е 30 m. Сечението е вписано в правоъгълен контур с размери 3,2 m × 2,2 m – вж. фиг. 1.

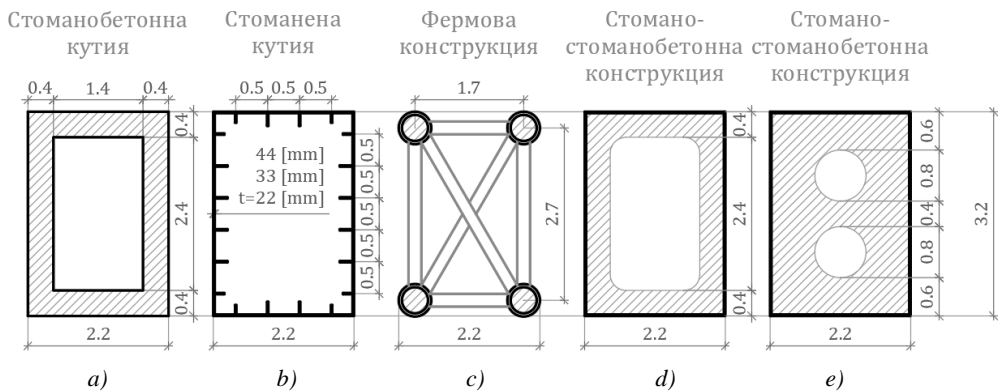


Фиг. 1. Геометрия на аналитичната постановка

## 2.2. Анализирани напречни сечения

В анализа са разгледани общо 8 различни сечения:

- Стоманобетонна кутия (1 сечение, вж. фиг. 2a). Стоманобетонното сечение е прието като хомогенно. Наличието на армировка в сечението е отчетено индиректно чрез специфична идеализация на материала „стоманобетон“. Това позволява да се проведат нелинейните анализи на устойчивостта.
- Стоманена кутия (3 сечения, вж. фиг. 2b). Стоманеното сечение е представено директно с отчитане на пълната геометрична форма, включително закоравяващите надлъжни ребра. В анализите са разгледани 3 броя аналогични сечения с разлика при дебелините на стените на кутията, съответно 22, 32 и 42 mm.
- Стоманена фермова конструкция (1 сечение, вж. фиг. 2c). Разгледано е сечение тип ферма, която е изградена от група стоманени тръбни сечения тип CHS508Ф50. Приета е предпоставката, че фермовите диагонали носят само укрепителна функция. Така се гарантира равнинността на сечението.
- Комбинирана фермова конструкция (1 сечение, вж. фиг. 2c). Това е допълнителен вариант на фермовата конструкция със стомано-стоманобетонно решение със запълнени стоманени тръбни сечения.
- Комбинирани кутиени сечения (2 сечения вж. фиг. 2d и 2e). Двете комбинирани сечения запазват идентична концепция. Масивното стоманобетонно ядро е поместено в тънък кутиен стоманен кожух с дебелина 11 mm. Разработени са два варианта за сечението. Разликата е в приложението на различни отвори в стоманобетонното ядро. При вариант 1 (фиг. 2d) ядрото формира стоманобетонна кутия с размери, които са аналогични на представеното на фиг. 2a стоманобетонно сечение. При вариант 2 (фиг. 2e) ядрото е плътно с два отвора с диаметър 800 mm.



Фиг. 2. Напречни сечения

### 2.3. Използвани материали

В анализите са заложили 3 основни материала:

- бетон С35/45;
- армировъчна стомана В500В;
- конструкционна стомана S355.

Във всички проведени анализи към темата не са отчитани корекционните фактори и коефициентите на сигурност по материалите, които са заложили в нормите. Тази предпоставка е приета за коректното съпоставяне на различните проведени анализи.

За дефинициите на поведението на материалите са използвани предпоставките за построяване на диаграмите на поведение съгласно [1 и 2].

#### 2.3.1. Бетон

За работната диаграма на бетона е използвана препоръчаната от [1] **параболно-линейна идеализация**.

#### 2.3.2. Армировъчна стомана

За работната диаграма на армировъчната стомана е използвана препоръчаната от [1] **би-линейна диаграма на поведението на стоманата с нарастващ клон сред провлачане**.

#### 2.3.3. Стоманобетон

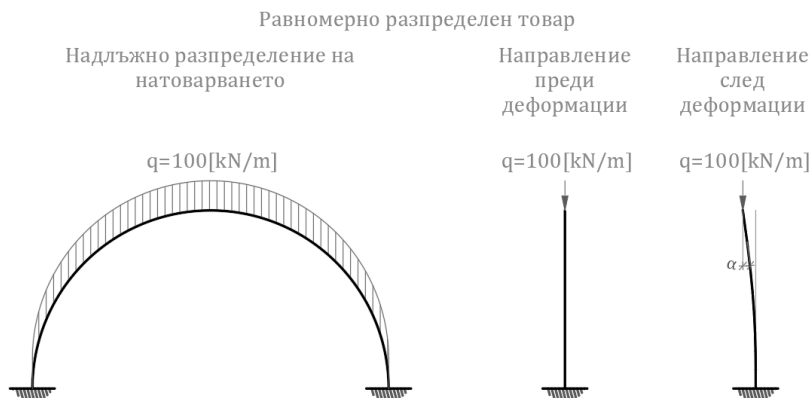
За опростяване на моделите моделирането на армировъчната стомана като дискретен армировъчен скелет не е целесъобразно. Поради това е представен идеализиран хомогенен материал с поведение на бетон в натиснато състояние и поведение на армировъчна стомана в опънато състояние. При този модел се приема предпоставката, че количеството армировка, която е вложена в сечението, е максималното необходимо количество за постигане на поведение на стомана в опънните зони.

#### 2.3.4. Конструкционна стомана

За конструкционната стомана е приета би-линейна работна диаграма с параметри съгласно предписанията на [3].

## 2.4. Натоварване

Моделът на натоварване, който е приет при анализите, се представя с дискретен товар, разположен осово на дъгата. Товарът е константен консервативен товар, който запазва направлението си в посоката на земното ускорение, вж. фиг. 3. За контролен товар е приета стойност от 100 kN/m.



Фиг. 3. Схема на натоварване

## 3. Аналитична постановка

За анализа на представените модели е използван прътов модел по МКЕ. Подбраният тип крайни елементи разполага с пълен комплект степени на свобода за крайните възли, както и допълнителна дефиниция за среден възел. Отчита се усукването в рамките на елемента. Така се позволява коректен анализ на криволинейни елементи.

### 3.1. Статически анализ

Резултатите от статическия анализ са представени с оглед на сравнение на представените конструкции. Полученият огъващ момент непосредствено преди точката на бифуркация е изразен чрез критичната сила. На базата на зависимостта между критичното натоварване и огъващия момент може да се изрази ограничението на носимоспособността от статическия анализ.

Анализът е проведен въз основа на редица модели с изменение на натоварването, релативно спрямо равнината на дъгата. Стъпката на изменението е приета от  $1^\circ$  в диапазона от 0 до  $45^\circ$ .

### 3.2. Анализ на устойчивостта на конструкцията

За анализа на общата устойчивост на конструкцията е проведен нелинеен стъпков анализ с отчитане на материалната нелинейност. За основа на анализа са приети начални несъвършенства, които са базирани на „псевдо“ (buckling) нелинеен анализ, при който се определят формите на загуба на устойчивост. Избрана е **първата форма на загуба на устойчивост извън равнината на дъгата.**

### 3.3. Носимоспособност на напречните сечения

Като **контролен параметър** за всяко основно направление на натоварването е приета съответната носимоспособност на сечението. На базата на проведените статически анализи е определена параметричната зависимост между базовия товар, който се използва за определяне на критичната сила за устойчивост и допустимия критичен огъващ момент на сечението.

Като се използва „методът на суперпозицията“ допустимият огъващ момент може да бъде представен като критична сила.

По този начин представените резултати имат един променлив параметър с два критерия за разрушение:

- разрушение вследствие на загуба на устойчивост;
- недостиг на носимоспособност на огъване в сечението.

Всяко от представените сечения приема различни предпоставки за определяне на неговата носимоспособност.

Напрегнатото състояние на конструкцията води до наличие на осова сила в елемента. Приетата носимоспособност е изчислена без отчитане на наличните в елемента осови сили.

#### 3.3.1. Стоманобетонни сечения

Носимоспособността на стоманобетонното сечение е определена на базата на представената методика в [1]. Стойностите на носимоспособността са представени чрез изградена итерационна диаграма за двусово огъване при нулева осова сила.

За коректно сравнение на базови параметри с представените носимоспособности за стоманени и комбинирани сечения е представена и еластичната носимоспособност на стоманобетонното сечение. При определяне на еластичната носимоспособност на сечението е приета симетрична армировка за натиск/опън в сечението. Принос на бетона към носимоспособността на сечението е приет само в натисквата зона. Натисквата зона е приета като идеализация с височина  $0,25$  от полезната височина ( $d$ ), считано от горен ръб на сечението.

#### 3.3.2. Стоманени сечения

Носимоспособността на стоманените сечения е определена на базата на еластично поведение.

#### 3.3.3. Комбинирани сечения

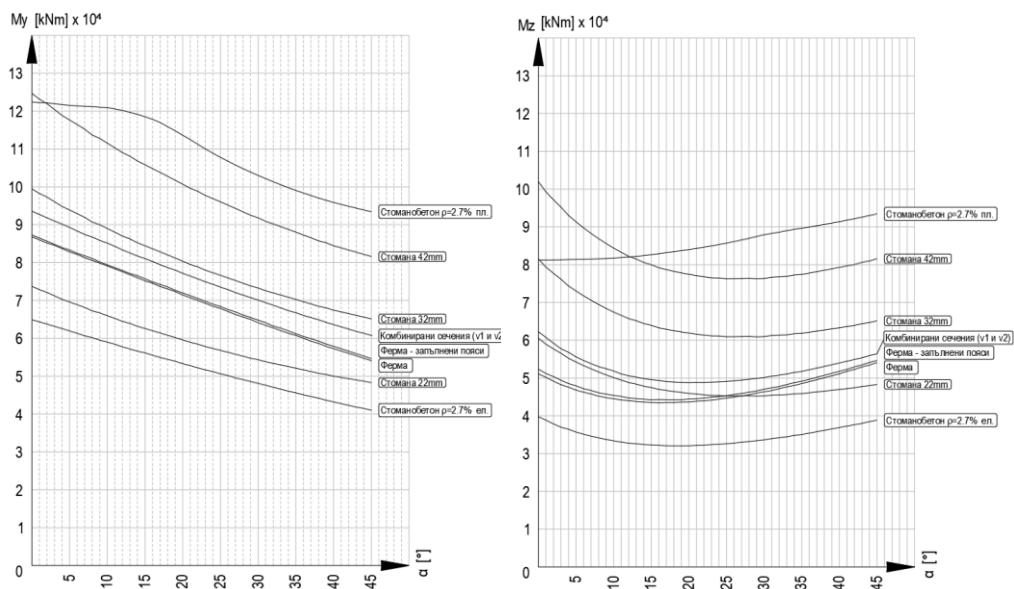
Носимоспособността на комбинирани сечения е определена на базата на еластично поведение. Приносът на бетона към носимоспособността на сечението е отчетен само в натисквата зона на сечението с индиректно отчетена натисква зона от  $1/4$  от височината на сечението.

## 4. Резултати от анализите

### 4.1. Носимоспособност на огъване на сеченията

Изготвени са редица изчисления за намиране на огъвната носимоспособност на напречните сечения, представени в точка 2.2. Намерена е носимоспособността на сечението за различни ъгли извън главните оси на сечението. С оглед на сравнение носимоспособността на огъване е представена като функция равномерно разпределен товар. Резултатите са представени графично като съотношение между максимална стойност на равномерно разпределен товар, водеща до разрушения от огъване в напречното сечение.

За определяне на носимоспособността на стоманобетонно сечение е приет коефициент за армиране от 2,75% за огъване и 5,5% за цялото сечение. Пластичната носимоспособност съгласно процедурата за непрекъснатост на деформациите е заимствана от [1].

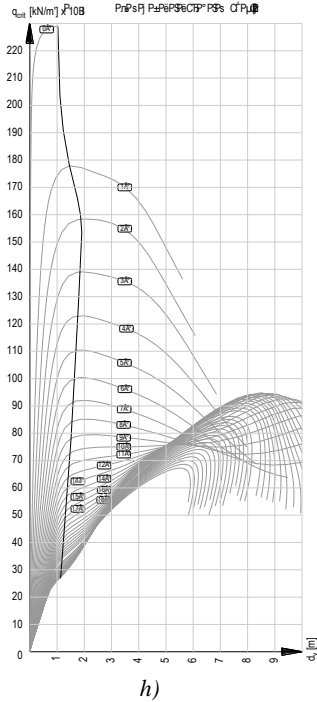
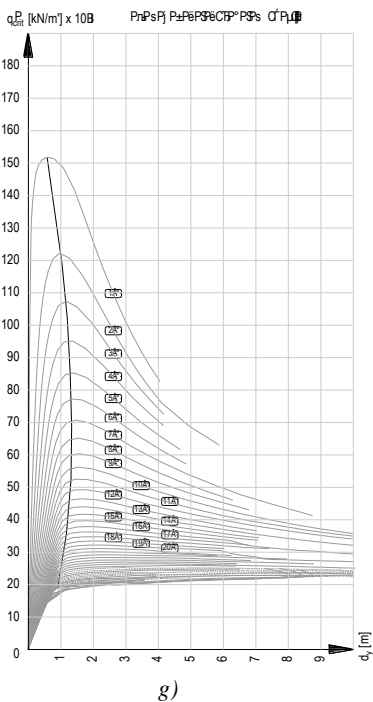
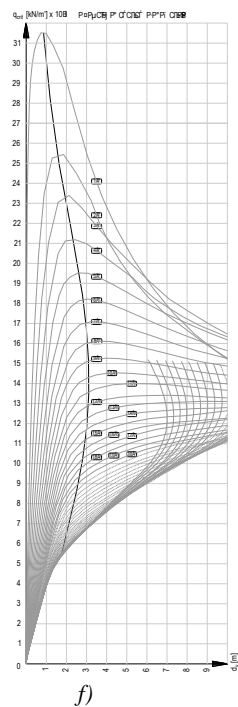
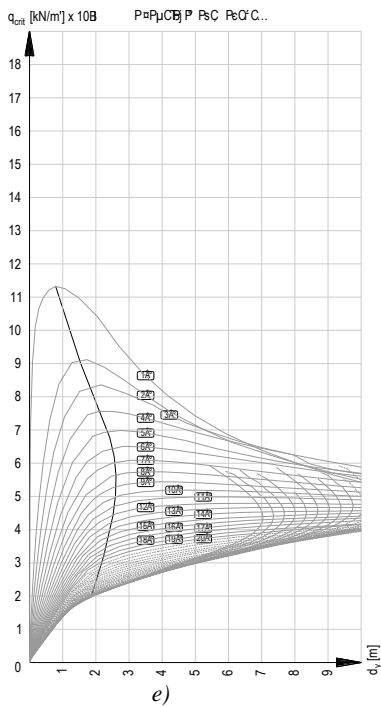


Фиг. 4. Графика на изменението на огъвната носимоспособност на сечението по направления  $M_y$  и  $M_z$  при различни ъгли на натоварване спрямо главните оси

### 4.2. Графична зависимост на параметрите, равномерно разпределен товар към деформации

На база на анализите с параметрите, представени в точка 0, са изготвени криви на зависимостта сила-деформации за всяка аналитична постановка. Решенията са представени графично като фамилия криви. За всеки ъгъл между равнината на дъгата и натоварването е представена отделна крива. Кривите са групирани по вид сечения.



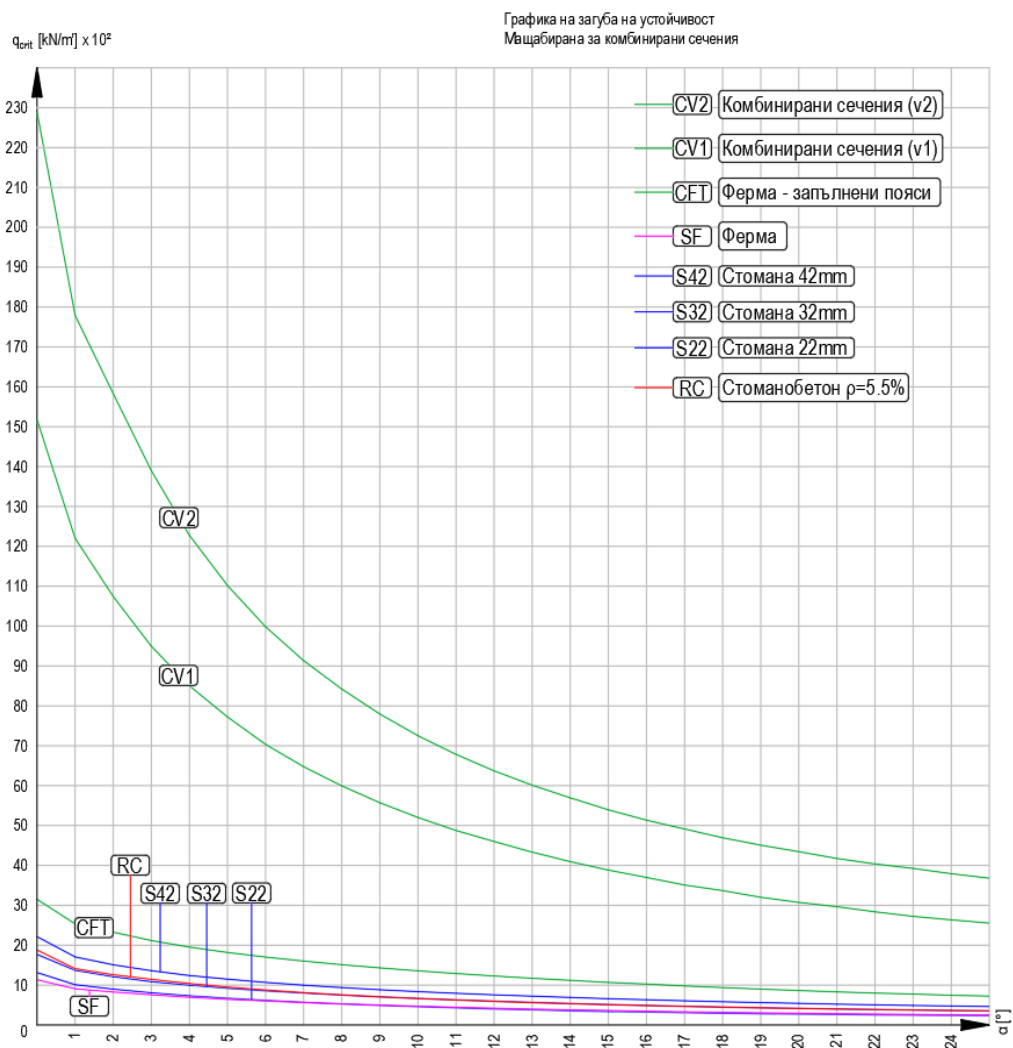


**Фиг. 6. Графична зависимост между деформации и критичен товар:**

*e) Ферма от тръбни профили; f) Ферма със запълнени с бетон тръбни профили; г) Комбинирано сечение тип 1; h) Комбинирано сечение тип 2*

### 4.3. Графична зависимост на критичния товар и ъгъла между равнината на дъгата и направлението на натоварването

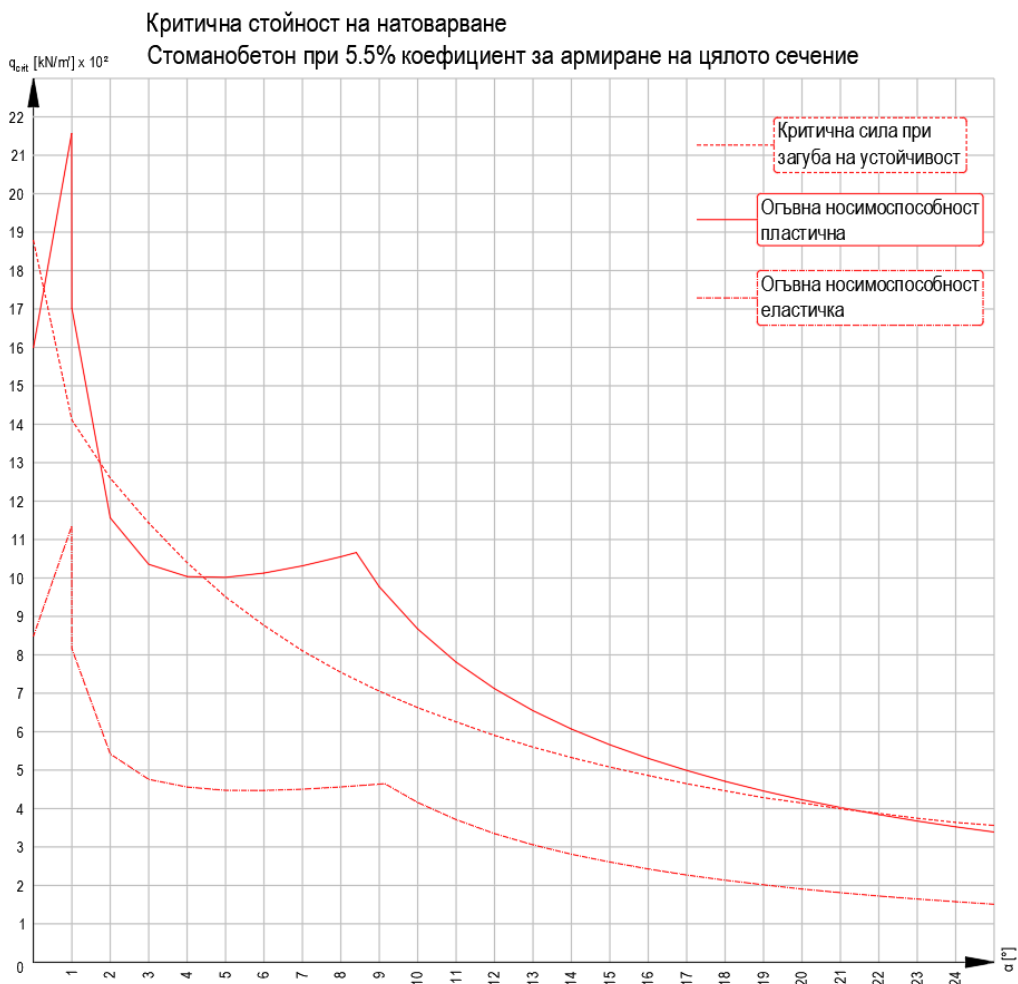
Данните, представени в точка 0, са обработени за получаване на еднозначна крива, определяща критичния товар за всяка от аналитичните постановки в зависимост от ъгъла между равнината на дъгата и направлението на натоварването.



Фиг. 7. Графична зависимост между критичен товар и ъгъл между равнината на дъгата и натоварването, мащабирана за типови сечения

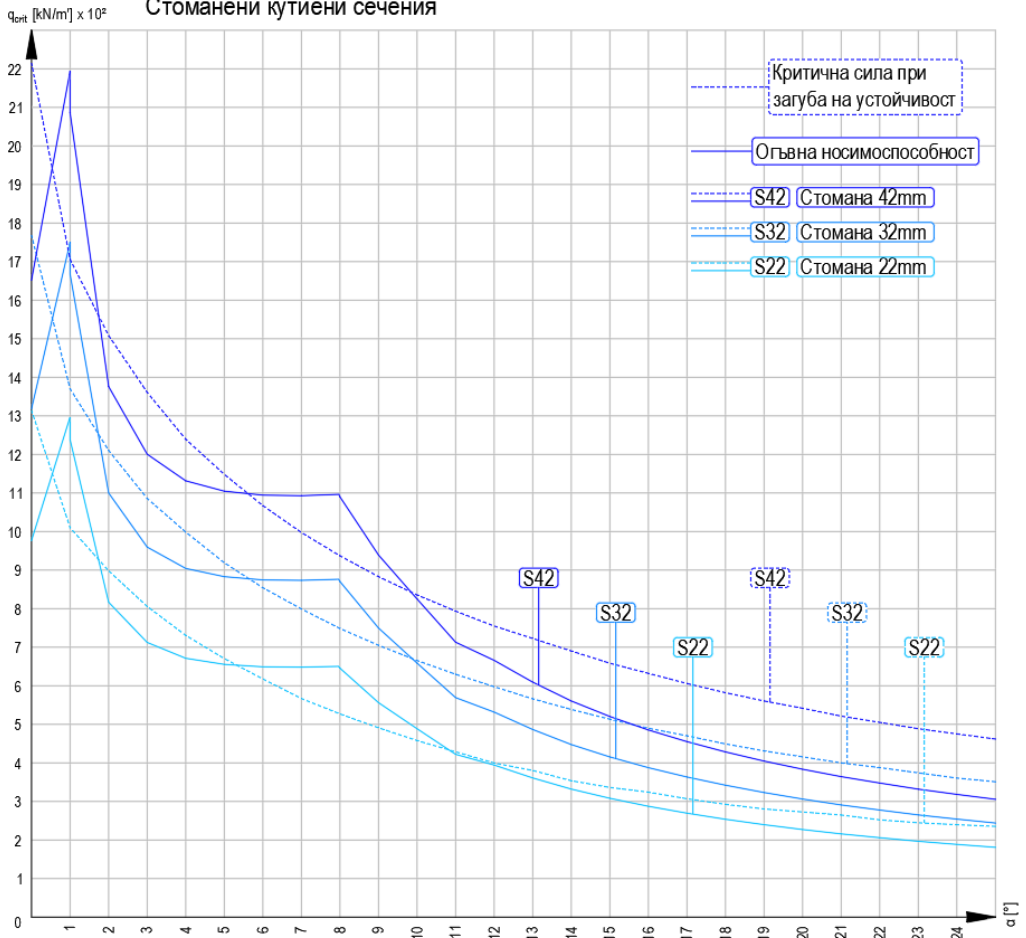
#### 4.4. Взаимовръзка на критериите на носимоспособност от загуба на устойчивост и разрушение от огъване в сечението

Представените резултати в точка 0 са обработен и обвързани със статично решение на постановките за представените ъгли. Критичният огъващ момент е отчетен в близост до запъването на дъгата. Огъвната носимоспособност е изразена като функция на равномерно разпределеното натоварване на база на носимоспособността на сечението и статичното решение за всеки ъгъл. Зависимостта е представена графично като гранична диаграма от критериите за разрушение от огъване по двете перпендикулярни оси на сечението. Така представеното графично решение е съпоставимо с резултатите от анализите на устойчивостта.

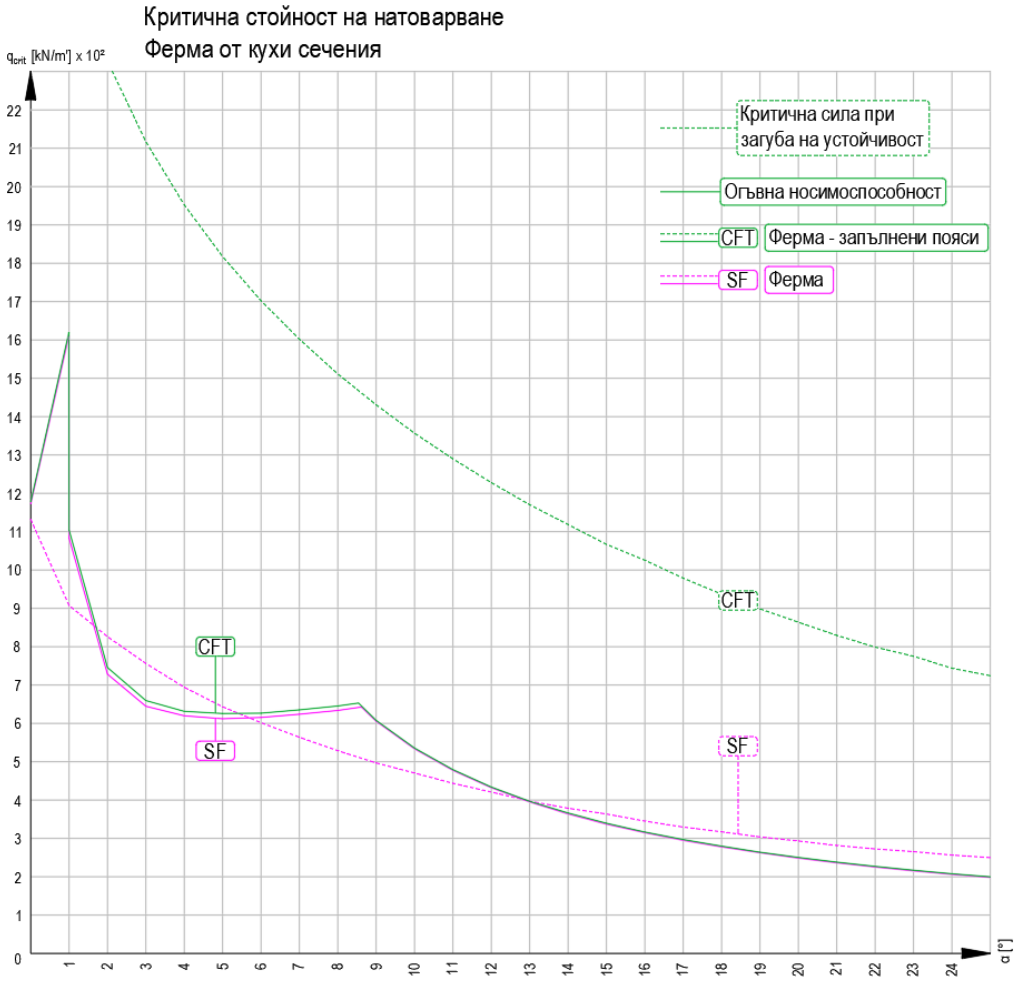


Фиг. 8. Сравнителна графична зависимост за критичен товар съгласно критериите на разрушение от огъване и загуба на устойчивост за стоманобетонно сечение

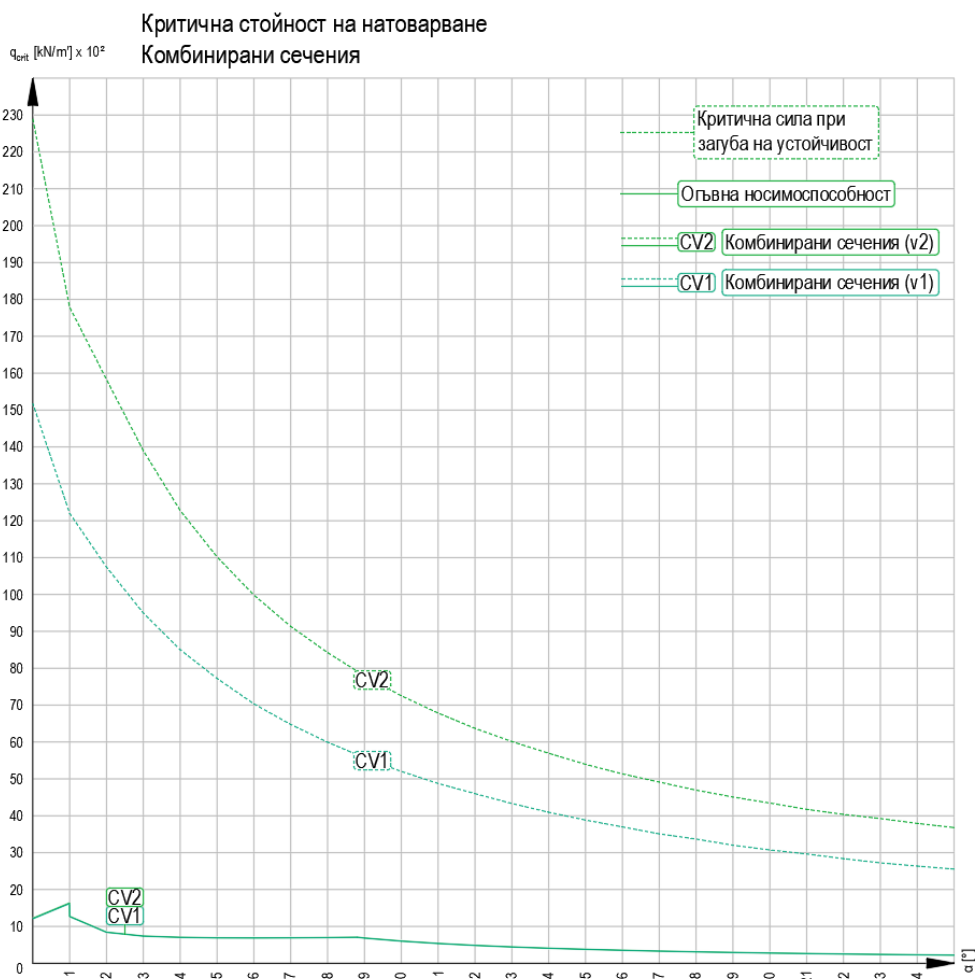
Критична стойност на натоварване  
 Стоманени кутиени сечения



Фиг. 9. Сравнителна графична зависимост за критичен товар съгласно критериите на разрушение от огъване и загуба на устойчивост за стоманени кутиени сечения



**Фиг. 10. Сравнителна графична зависимост за критичен товар съгласно критериите на разрушение от огъване и загуба на устойчивост за фермови сечения с кухи и запълнени с бетон профили**



Фиг. 11. Сравнителна графична зависимост за критичен товар съгласно критериите на разрушение от огъване и загуба на устойчивост за комбиниранни кутиени сечения

## 5. Заключение и бъдещи насоки

Получените от анализа научно-приложни резултати могат да се обобщят както следва:

1. Представена е методика, основаваща се на МКЕ, за анализ на устойчивостта на различни по материал дъгови конструкции. В анализа е заложена за материалите геометрическа и материална нелинейност за постигане на максимална точност.

2. Получена е серия от криви на зависимостта „външно натоварване-деформация“ за лесното определяне на точката на „бифуркация“.

3. Анализирано е значението на ъгъла на външното натоварване спрямо равнината на дъгата.

4. Направени са сравнения за устойчивостта на дъгови конструкции, изпълнени от различни материали:

- изцяло от стоманобетон;

- изцяло от стомана;
- комбинирани стомано-стоманобетонни.

Представените обработени резултати имат теоретичен характер и могат да се прилагат за определяне на ориентировъчно поведение на загубата на устойчивост на дъгови конструкции. При анализ на графиките може да се направи заключение за устойчивото поведение на дъговите конструкции. При товарни състояния извън равнината на дъгата критичният товар има ясно изразен характер на прогресивно намаляване с нарастване на отклонение на ъгъла на приложната сила. Като граници на регресията на критичната сила може да се приеме, че при отклонение на силата от  $5^\circ$  критичната сила в конструкцията намалява с приблизително 50%. При отклонение от  $20^\circ$  силата намалява с 75%. За постановки с ъгъл на отклонение на силата над  $20^\circ$  нямат ясно изразена точка на бифуркация. Кривата на критичната сила, като функция на ъгъла, достига линейно поведение и регресивният ѝ характер се дефинира от еласто-пластичното поведение на системата.

Чрез графичния израз на зависимостта критичен товар-деформации може лесно да се проследи податливостта на представените конструкции, която е индиректен показател за тяхната коравина. Сравнителният анализ показва, че повишените коравинни характеристики на комбинираните стомано-стоманобетонни конструкции подобряват тяхното устойчиво поведение и капацитет многократно.

При сравнение на критериите на разрушение от загуба на устойчивост и носеща способност на огъване, представени в точка 4.4, може да се обособи носимоспособността на огъване извън равнината и това е ключов параметър за общата носимоспособност на конструкцията. Пресичането на графиките показва невъзможността за определяне на единен критерий за разрушение и анализите за носимоспособност е необходимо да включват както анализ на огъвната носимоспособност, така и анализ на устойчивостта. При комбинираните сечения има ясно изразена тенденция за значителен капацитет на устойчивост. Това води до основен параметър, определящ носимоспособността на сечението, която да е огъвната носимоспособност на сечението.

Посочените зависимости може да се използват за определяне на ключови параметри в зависимост от отклонението на товара извън равнината му. На база на диаграмите, могат да се определят параметри за подбор на напречното сечение с подходящи параметри по двете им главни оси, прилагането на укрепителни системи, влияние на геометрични несъвършенства,  $p$ - $\Delta$  ефекти, поведение при товарни комбинации с ясно изразени натоварвания извън равнината им. При подходящо избрано сечение, ъгли под  $10^\circ$  и еластичен анализ на конструкциите, проблемите на устойчивостта може да не се анализират.

Темата поставя основа за последващи анализи и съпоставки, разширявайки каталога от напречни сечения и прилагането му при различни статични постановки. Изграждането на подобна база данни за поведението дава отправна точка за подбор на геометрията и формообразуване на конструкции с дъгови носещи елементи.

## Благодарности

Авторите изразяват благодарност към ЦНИП при УАСГ за финансирането на проекта „Анализ на стомано-стоманобетонни комбинирани елементи при дъгови конструкции“ – БН 237/20.

## ЛИТЕРАТУРА

1. BDS EN 1992-1-1:2005. Evrokod 2: Proektirane na stomanobetonni konstruksii. Chast 1-1: Obshti pravila i pravila za sgradi.

2. BDS EN 1993-1-1:2005. Evrokod 3: Proektirane na stomaneni konstruksii. Chast 1-1: Obshti pravila i pravila za sgradi.
3. BDS EN 1994-1-1:2005. Evrokod 4: Proektirane na kombinirani stomanostomanobetonni konstruksii. Chast 1-1: Obshti pravila i pravila za sgradi.
4. *Hendy, C. R., Smith, D. A.* Designers` guide to EN 1992-2. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 2: Concrete bridges, Thomas Telford, 2007, ISBN: 978-0-7277-3159-3.
5. *Chen, W., Duan, L.* Handbook of International Bridge Engineering, CRC Press, 2014, ISBN: 978-1-4398-1030-9.
6. Topurov, K. Stomanobetonni patni i zhelezopatni mostove. ABC Tehnika, 2012, ISBN: 978-954-8873-93-2.
7. LUSAS, Theory Manual Volume 1.
8. LUSAS, Theory Manual Volume 2.
9. LUSAS, Element Reference Manual.
10. *Karnovsky, I.* Advanced Methods of Structural Analysis, Springer, 2009, ISBN: 978-1489983350.
11. *Petel, V.* Concrete-Filled Stainless Steel Tubular Columns. CRC Press, 2018, ISBN: 978-0367656836.
12. *Lacarbonara, W.* Nonlinear Structural Mechanics: Theory, Dynamical Phenomena and Modeling, Springer, 2013, ISBN: 978-1441912756.
13. *Narayanan, R.* Steel-Concrete Composite Structures: Stability and Design (Stability and strength). CRC Press, 2014, ISBN: 978-1851661343.
14. *Karnovsky, I.* Theory of Arched Structures: Strength, Stability, Vibration, Springer, 2011, ISBN: 978-1461404682.

## ANALYSIS OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE ELEMENTS FOR LINEAR ARCH STRUCTURES

**A. Jiponov<sup>1</sup>, V. Nikolov<sup>2</sup>, D. Dimitrov<sup>3</sup>, M. Traykova<sup>4</sup>**

*Keywords: composite structures, arch, FEM, stability*

### ABSTRACT

The current work aims to enrich the knowledge about the behaviour of rare design solutions considering the trend of their growing popularity. The presented typical bridge linear arch elements are analysed under loading out of their arch plane. A series of analysis comparing various cross-sections and load angles of the element are presented. For the current analysis and comparisons of bending and stability capacity, idealized FE models considering geometrical and material non-linearity are created.

---

<sup>1</sup> Alexander Jiponov, Chief Assist. Dr. Eng., Dept. "Road Construction and Transport Facilities", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ajiponov\_fte@uacg.bg

<sup>2</sup> Vasil Nikolov, Eng., Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: v.tz.nikolov@gmail.com

<sup>3</sup> Dimitar Dimitrov, Prof. Dr. Eng., Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: dim1959sk@abv.bg

<sup>4</sup> Marina Traykova, Prof. Dr. Eng., Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: marina5261@abv.bg