



*Получена: 24.09.2020 г.*

*Приета: 15.10.2020 г.*

## **ПРИЛОЖЕНИЕ НА ОБЩИЯ МЕТОД НА EN 1993-1-1 ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ГРАНИЧНИЯ ТОВАР ПРИ ОБЩА ЗАГУБА НА УСТОЙЧИВОСТ НА ПОРТАЛНИ РАМКИ – АНАЛИЗ НА СЪЩЕСТВУВАЩИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ**

**Ч. Пенелов<sup>1</sup>**

*Ключови думи: стоманени портални рамки, измятане, общ метод, GMNIA*

### **РЕЗЮМЕ**

Анализирани са резултатите от съществуващо експериментално изследване на три стоманени портални рамки, разрушаващи се чрез обща загуба на устойчивост (измятане) на ригела. Рамковите възли не са укрепени директно срещу усукване, а ригелите на рамките са укрепени срещу странична трансляция само по горните си пояси, в местата на присъединяване на столиците. За споменатите рамки е налично и съществуващо изследване с геометрически и физически нелинеен анализ (GMNIA) с еквивалентни геометрични дъгово-усуквателни начални несъвършенства.

В статията е определена носещата способност на рамките съгласно общия метод от точка 6.3.4 на EN 1993-1-1:2005. В допълнение е проведен GMNIA с дъгово геометрично несъвършенство на ригела съгласно EN 1090-2, като са отчетени и остатъчните нормални напрежения в резултат на валцуването. Граничните вертикални товари на рамките, получени по общия метод, са сравнени с резултатите от съществуващо експериментално изследване, както и с резултатите от споменатите два типа GMNIA.

---

<sup>1</sup> Чавдар Пенелов, гл. ас. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, Строителен факултет, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: penelov\_fce@uacg.bg

## 1. Някои дискуссионни въпроси, свързани с приложението на общия метод

Общият метод (*general method*) от т. 6.3.4 на EN 1993-1-1:2005 [10] се прилага в случаите, когато не е възможно прилагането на методите от т. 6.3.1, 6.3.2 и 6.3.3 на същия стандарт [10], отнасящи се за проверката на обща устойчивост на елементи, подложени на натиск и/или единично огъване. В българското национално приложение [1] към [10], изготвено през 2011 г., прилагането на общия метод бе забранено до „разработване на методика на приложимост” и тази забрана се отчита като не съвсем уместна в [3]. На база на натрупания национален опит в прилагането на общия метод [2 – 4], през 2019 г. катедра „Метални, дървени и пластмасови конструкции” (МДПК) при Строителния факултет на УАСГ направи предложение за легализирането на общия метод и у нас. Основните положения на общия метод са подробно изложени в [3, 4]. Алгоритъмът на общия метод е подробно изложен и в т. 5, 6, 7 и 8 от настоящата работа.

EN 1993-1-1:2005 дефинира твърде широк обхват на приложение на общия метод (пълностенни или решетъчни елементи с постоянно или променливо напречно сечение, като са възможни произволни условия на странично подпиране; равнинни рамки или части от рамки, съставени от такива елементи, подложени на натиск и/или единично огъване в равнината на рамката), като поставя условие методът да не се ползва за елементи с ротиращи пластични стави. Този твърде широк обхват обаче не е подкрепен с широкомащабни научни изследвания. С други думи, актуален е въпросът за дефиниране на обособен обхват на приложение на общия метод.

Съгласно становището на ECCS TC8 [8] общият метод следва да се прилага за линейни елементи, при които изкълчването и/или измятането се проявяват както при праволинейни елементи. Така например, според [8] общият метод не следва да се прилага за портални рамки, при които за меродавната огъвно-усуквателна форма на загуба на устойчивост се наблюдава едновременно измятане на ригела и колоната в зоната на рамковия възел. Счита се, че за да бъде приложен общият метод за портални рамки, е необходимо рамковите възли да бъдат укрепени срещу странична трансация и усукване, за да може ригелът и колоните да се разглеждат като отделни номинално праволинейни елементи. Подобна предпазливост относно прилагането на общия метод не е лишена от основание, тъй като кривите за изкълчване и измятане са валидирани (теоретично и експериментално) основно за праволинейни елементи, укрепени като минимум срещу странична трансация и усукване в краищата си (т.нар. нормални условия на странично подпиране, или „вилична опора”). В допълнение, съгласно [8] коефициентът на загуба на устойчивост по общия метод  $\chi_{op}$  (отчитащ се в зависимост от условната стройност по общия метод  $\bar{\lambda}_{op}$ ) следва да се приема като по-малката стойност от коефициента на изкълчване  $\chi_z$  и коефициента на измятане  $\chi_{LT}$ .

Подобни клаузи са заложили и в британското национално приложение [6] към EN 1993-1-1:2005 [10], където се изисква общият метод да се прилага за „номинално праволинейни” елементи.

В немското национално приложение [7] към [10] общият метод се допуска да се прилага за елементи с двойно Т-напречно сечение, като не се дават по-специални ограничения на обхвата му на приложение. В допълнение коефициентът на сигурност се приема  $\gamma_{M1} = 1,1$ , а коефициентът  $\chi_{op}$  се приема както следва:

- за централно натиснати елементи  $\chi_{op} = \chi_z$ ;
- за елементи, подложени на огъване  $\chi_{op} = \chi_{LT}$ ;
- за нецентрично натиснати елементи  $\chi_{op}$  е по-малкият от  $\chi_z$  и  $\chi_{LT}$  ( $\chi_{LT}$  се определя съгласно т. 6.3.2.2 на [10]).

Подобен подход за избор на  $\chi_{op}$  бе възприет и в предложението за легализиране на общия метод у нас.

*Simoes da Silva* и колектив [13] провеждат задълбочено мащабно изследване върху приложението на общия метод за изолирани елементи с постоянно сечение, подпирани с „вичични” опори в краищата си, като правят извод, че за нецентрично натиснати елементи методът може да е консервативен (до ок. 20%) или неконсервативен (до ок. 12%) в сравнение с методиката от т. 6.3.3 на [10]; същевременно се отбелязва, че геометрическият и физическият нелинеен анализ (*geometrically and materially nonlinear analysis*, GMNIA) с отчитане на остатъчните напрежения и геометричните несъвършенства съгласно EN 1090-2 [9] води до по-голяма носеща способност в сравнение с опростената нормативна процедура от т. 6.3.3 на [10]. Отбелязва се консервативността на общия метод при центрично натиснати елементи.

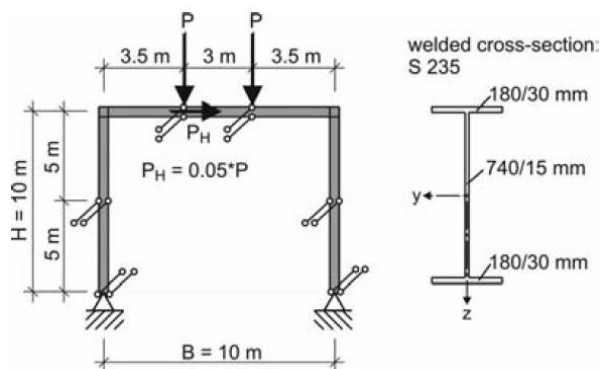
В работата на *Marques* [12] са дадени предложения за подобряване на процедурата на общия метод за изолирани елементи с променливо сечение, както и на метода от т. 6.3.3 на [10]. Предложени са уточнени процедури за установяване на т.нар. критично сечение, както и за по-подходящо дефиниране на криви на изкълчване/измятане.

В [5] като пример за възможно приложение на общия метод са дадени порталните рамки, служещи за опори на окачения релсов транспорт в немския град Вупертал (фиг. 1), част от които са укрепени срещу усукване единствено при базите на колоните, а ригелът (с криволинейни участъци в зоната на свързване към колоните) е подпрян транслационно в средната си част само на нивото на горния си пояс. За съжаление, тази либерална теза относно обхвата на приложение на общия метод не е подкрепена с публикувани експериментални изследвания, като на пръв поглед влиза в противоречие с изразеното от ECCS TC8 становище. Редно е да се отбележи, че общата загуба на устойчивост на рамките от фиг. 1 е свързана със съвместно измятане на ригела и колоната, включващо и криволинейния участък.



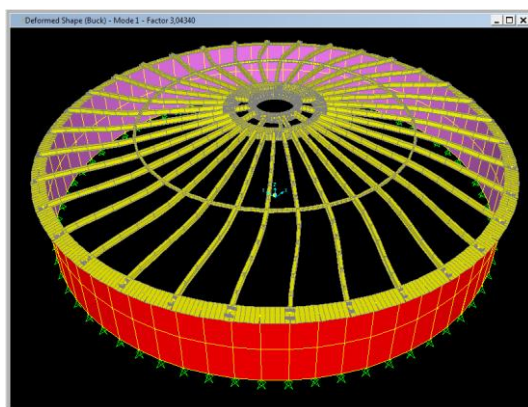
**Фиг. 1. Портална рамка, служеща за опора на окачения релсов транспорт в град Вупертал, Германия [16]**

В работата на *Lechner* и колектив [11] е проведено числено изследване на подобна портална рамка с елементи с постоянно сечение и неукрепени срещу странично преместване и усукване рамкови възли, при която ригелът и колоната се свързват под прав ъгъл (фиг. 2). За целта е използван GMNIA с отчитане на началните несъвършенства. Показано е, че за изследваната рамка общият метод е в полза на сигурността с около 12% спрямо по-точния GMNIA.



Фиг. 2. Портална рамка, изследвана числено в [11]

В работата на *Zdravkov* [18] е демонстрирано приложението на общия метод при проектирането на радиалните елементи на самоносещ коничен покрив на вертикален цилиндричен резервоар (фиг. 3). Споменатите елементи отговарят на изискванията на ECCS TC8 за приложение на общия метод.



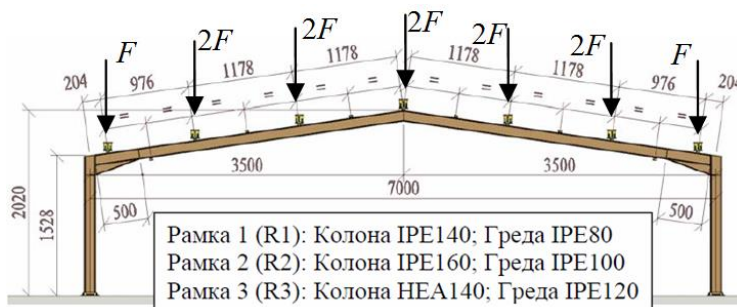
Фиг. 3. Деформирана схема на коничен покрив, който губи устойчивост [18]

Очевидно е, че на този етап мненията относно обхвата на приложение на общия метод (за изолирани елементи или и за цялостни конструкции) са твърде различни, което може да се обясни с ограничените изследвания в тази област, както и с обстоятелството, че повечето експериментални и теоретични изследвания разглеждат изолирани елементи, а не цялостни конструкции.

## 2. Описание на експерименталното и численото параметрично изследване на портални рамкови конструкции от [2]

Много често в практиката не се прилага директно укрепяване срещу усукване на рамковите възли „ригел-колона” на порталните рамки на сгради, както и не се укрепява директно долният натиснат пояс на ригела в зоната на отрицателния огъващ момент. Ригелът е укрепен странично само в местата на присъединяване на столиците по горния му

пояс (фиг. 4, заимствана от [2]). Именно такива портални рамки, с вути в краищата на ригела, са изследвани експериментално (3 броя рамки) и аналитично в дисертационната работа на *Василев* [2]. Колоните са укрепени срещу усукване единствено при базите си. На база мащабно числено параметрично изследване на портални рамки (3 692 броя) с гравитационен товар, извършено с геометрически и физически нелинеен анализ (GMNIA), с отчитане на еквивалентни начални геометрични несъвършенства, в [2] е направен извод, че „... в масовия случай общият метод, прилаган за рамката като цяло, води до резултати в полза на несигурността...” в сравнение с по-точния GMNIA. Според [2] неконсервативността на общия метод е най-голяма за ригели, които са много по-склонни към измятане в сравнение с колоната, като от [2] може да се заключи, че общият метод е възможно да преувеличава носещата способност до около 5 пъти, вж. фиг. 5. Този извод, по мнението на автора е дискуссионен, тъй като евентуално по-големите коравини на усукване и на огъване (извън равнината на рамката) на колоната спрямо ригела водят до по-стабилно странично подпиране на ригела в краищата му, което би трябвало да води до резултат от общия метод, близък до този, който би се получил, ако ригелът се разглежда като изолиран огънат елемент (поради малката осова сила) с по-сложни условия на странично подпиране. Това би трябвало да направи поведението на ригела по-добре предсказуемо по методиката на EN 1993-1-1:2005, а не обратното. На практика критиката от [2] към общия метод в този случай се трансформира в критика към методиката на Еврокод 3 за проверка на елементи, подложени на огъване.



Фиг. 4. Схема на рамките, изследвани експериментално в работата на *Василев* [2]

Въз основа на направените в [2] изводи, както и на базата на съществуващия национален опит, от катедра МДПК на УАСГ бе направено предложение новият вариант на българско национално приложение към EN1993-1-1 да ограничи на този етап прилагането на общия метод само за отделни номинално праволинейни елементи, укрепени срещу странично отместване и усукване в двата си края. Споменатото предложение по принцип е в съзвучие със становището на ECCS TC8, но на практика не допуска изследването по общия метод на рамки, като показаната на фиг. 4, като по този начин единствената алтернатива за доказването на общата устойчивост на подобни рамки е прилагането на по-трудоемкия (и изискващ много висока квалификация на проектанта) GMNIA.

### 3. Обосновка на настоящото изследване

Както бе отбелязано по-горе, в дисертацията [2] се изказва мнението, че в повечето случаи общият метод не е в посока на сигурността, в случай че се прилага за цялостни рамки, като показаната на фиг. 4, т.е. с възли, неукрепени директно срещу усукване, и

при липса на укрепвания на долния пояс на ригела. Този извод е направен на база параметричен нелинеен анализ на голям брой портални рамки. В [2] обаче не са посочени носещите способности на трите експериментално изпитани [2] портални рамки, определени по общия метод, което не дава възможност сигурността на общия метод да бъде оценена за тези рамки (експериментите в [2] са използвани основно за доказване на валидността на използвания за параметричните изследвания GMNIA).

В настоящата работа, с помощта на общия метод от т. 6.3.4 на [10], са определени носещите способности на трите експериментално изпитани в [2] рамки, като са сравнени с носещите способности, определени на базата на експерименталното изследване и GMNIA, проведени в [2]. В допълнение, в настоящата работа е извършен GMNIA с отчитане на остатъчните напрежения от валцуване, в комбинация с начални геометрични несъвършенства. Целта е да се проверят направените в [2] изводи относно неконсервативността на общия метод, както и да се обогати националният ни опит в приложението на метода.

#### 4. Кратко описание на експерименталните образци на портални рамки в [2]

Схема на експериментално изпитаните в [2] едноотворни едноетажни портални рамки е дадена на фиг. 4. Напречните сечения на рамките (горещовалцувани профили) са дадени в табл. 1. Класът стомана е S275. В същата таблица са дадени и експериментално определените граници на провлачане  $f_{y,exp}$  на стелбата на ригелите на трите изпитани рамки (и за трите рамки носещата способност при измятане на ригела е определяща за носещата способност на рамката като цяло). Тук е прието, че границата на провлачане на поясите е същата като тази на стелбото.

Колоните са ставно свързани към фундаментите в равнината на рамките и извън нея, като на нивото на базите на колоните са възпрепятствани преместването извън равнината на рамката и усукването. В местата на концентрираните сили по горните пояси на ригелите са приложени подпирания, ограничаващи преместването извън равнината на рамките. В този смисъл, опитната постановка от [2] разглежда един често срещан в българската практика случай на странично укрепяване на портална рамка.

Таблица 1. Данни за трите експериментално изпитани рамки [2]

Рамка	Колона	Ригел	
	Напречно сечение	Напречно сечение	$f_{y,exp}$ (MPa)*
R1	IPE 140	IPE 80	526
R2	IPE 160	IPE 100	321
R3	HEA 140	IPE 120	471

\* Пробните тела са изрязани от стелбата на профилите. Стойностите са осреднени от три пробни тела.

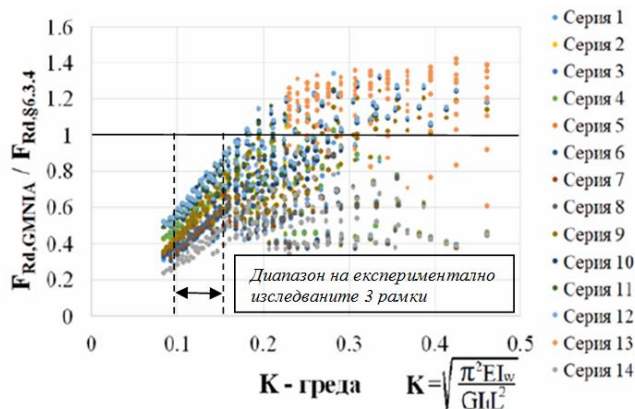
Процедурата на EN 1993-1-1:2005 за нецентрично натиснати елементи, дадена в т. 6.3.3 на [10], не може да бъде приложена директно за елементите на разглежданите тук експериментално изследвани рамки по следните причини:

- в зоната на вутите ригелите на рамката са с променливо напречно сечение;
- колоните не са директно укрепени срещу усукване в горния си край, което също води до неясни условия на странично подпирание в краищата на ригела;

- за целите на проверката на обща устойчивост рамката не може да бъде разделена (без обосновка) на участъци, укрепени срещу странично преместване и усукване в краищата си (нормални условия на странично подпиране);
- ригелът не е праволинеен по дължината си, като в чупката в билото липсва укрепяване срещу усукване.

Именно по тези причини проверката на носимоспособността на рамките е редно да се извърши по общия метод на EN 1993-1-1, т. 6.3.4, като загубата на обща устойчивост (при огъвно-усуквателна форма) в еластична постановка е необходимо да се изследва за рамката като цяло.

Фиг. 5, заимствана от дисертацията [2], обобщава изказаната в нея теза за неконсервативност на общия метод. Геометричните размери на параметрично изследваните в [2] 14 серии от рамки са различни от тези на експериментално изпитаните 3 рамки (параметрично изследваните рамки са с греди IPE 180- IPE 600 с отвор 12 – 24 m, като броят на страничните подпирания по горния пояс за всеки скат е от 4 до 7). В [2] е използван бездименсионният параметър на усукване на ригела  $K$ , дефиниран на фиг. 5 [2], характеризиращ склонността на ригела към измятане (по-малък  $K$  води до по-голяма склонност на ригела към измятане). На същата фигура с  $J_w$ ,  $J_t$  и  $L$  са означени съответно секториалният инерционен момент, инерционният момент при усукване и отворът на ригела. За експериментално изпитаните рамки R1, R2 и R3 коефициентът  $K$  е със стойности съответно 0,1, 0,12 и 0,16, като според фиг. 5 от [2] би следвало да се очаква общият метод по-скоро да преувеличава носещата им способност поне с 20 – 50%. Всички рамки от маркирания на фиг. 5 диапазон, изследвани с GMNIA в [2], се разрушават чрез измятане на ригела, т.е. реално ригелът има поведение, сходно с поведението на изолиран номинално праволинеен елемент с по-сложни условия на странично подпиране.



Фиг. 5. Отношение на носещите способности, получени от GMNIA и общия метод от т. 6.3.4 на EN 1993-1-1 за числено изследваните в [2] 3692 рамки

## 5. Определяне на граничните множители на експериментално изпитаните рамки

Граничният множител  $\alpha_{ult,k}$  е коефициентът, с който трябва да се завиши базовото натоварване, за да се достигне до образуване на първа пластична става (напречните сечения на елементите са от клас 1). Т. нар. критично сечение (съгласно т. 6.3.4 на [10]) на

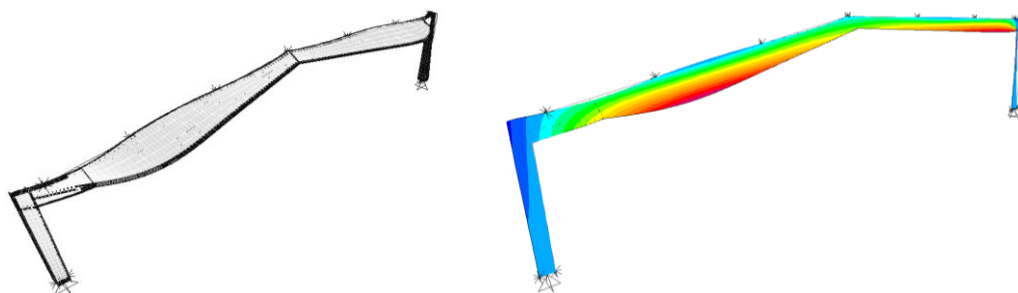
разглежданите рамки е напречното сечение на ригела, разположено непосредствено преди върха на вутата. За определяне на граничния множител се използват равнинни модели на рамките, изготвени с помощта на гредови (*frame*) крайни елементи. Тъй като в експерименталната постановка липсва действителен хоризонтален товар, необходимо е статическият анализ на рамките в равнината им да се проведе с отчитане на началните хоризонтални отмествания на възлите. Определеният съгласно [10] начален ъгъл на наклон на колоните е  $\Phi = 1/230 \text{ rad}$ , причиняващ съответните еквивалентни хоризонтални сили  $H_{\text{eq}}$  в горния край на колоните, добавящи се към действащия вертикален товар. Граничният множител на базовото ( $F = 1 \text{ kN}$ ) натоварване (фиг. 4) отговаря на интензивността на въздействията (вертикален товар плюс еквивалентни хоризонтални сили), при която се образува първа пластична става в ригел. Съгласно критерия, даден в т. 5.2.1(3) на EN 1993-1-1 [10], е необходимо статическият анализ в равнината на рамката да се проведе с отчитане на ефектите от втори ред. Еквивалентните хоризонтални сили и ефектите от втори ред водят до редуциране на граничния множител с около 5 – 8%. Съгласно критерия от т. 5.3.2(6) на [10] дъговете начални несъвършества на елементите в равнината на рамката е необходимо да се отчитат в статическия анализ само за ригела PE 80 на рамка R1. Влиянието им върху стойността на максималния огъващ момент в ригела (а оттам и върху стойността на граничния множител) обаче се оказва пренебрежимо малко. За определянето на  $\alpha_{\text{ult,k}}$  е използвана уточнената зависимост между носещите способности на огъване и натиск на напречното сечение (формула 6.36 от [10]). На практика нормалните сили в ригелите, съответстващи на граничните множители, не влияят на носещата способност на огъване на напречните сечения на ригелите. За определяне на граничните множители се работи с експериментално определените граници на провлачане на ригелите. Граничните множители на трите рамки са дадени в табл. 2. Собственото тегло на рамките оказва незначително влияние на стойностите на граничните множители.

## 6. Определяне на критичните множители на експериментално изпитаните рамки

Критичният множител  $\alpha_{\text{cr}}$  е коефициентът, с който трябва да се завиши базовото натоварване, за да се достигне до загуба на устойчивост в еластична постановка, свързана с изкълчване извън равнината на рамката или измятане. Устойчивостта на рамките (при огъвно-усуквателна форма) в еластична постановка (*buckling analysis*) е изследвана с програмата SAP2000 [15], като за целта са използвани пространствени изчислителни модели на рамките, изготвени с помощта на черупкови (*shell*) крайни елементи. По този начин в споменатия софтуер се отчита възможността за депланация на напречните сечения на рамките. В тези модели подпирането на рамките във и извън равнината им е съгласно експерименталната постановка (фиг. 4). Рамките се натоварват с базовия вертикален товар ( $F = 1 \text{ kN}$ ). Собственото тегло на рамките оказва незначително влияние върху стойностите на критичните множители.

Първата форма на загуба на устойчивост за всички рамки е огъвно-усуквателна, свързана с измятане на ригел, провокирано от страничното отместване на неукрепения му долен пояс (фиг. 6). Наблюдава се усукване на ригелите спрямо горния им, укрепен от столиците пояс. Критичните множители на рамките, получени по описаната процедура, са дадени в табл. 2. Сходни по стойност с получените тук критични товари са критичните товари на трите рамки, получени в [2].





а) деформирана схема

б) изолинии на страничните модални премествания

Фиг. 6. Първа форма на загуба на устойчивост (огъвно-усуквателна) на рамка R3 в еластична постановка ( $F = 1 \text{ kN}$ ;  $\alpha_{cr} = 7,4$ )

Таблица 2. Междинни резултати от изчисленията по общия метод

Рамка	Критичен множител $\alpha_{cr}$	Граничен множител $\alpha_{ult,k}$	Условна стройност $\bar{\lambda}_{op}$	Коефициент $\chi_{op}$
R1	2,54	2,90	1,07	0,617
R2	4,58	3,10	0,82	0,784
R3	7,40	7,10	0,96	0,690

Въпреки липсата на директно „влично” странично подпиране в краищата на ригела, за меродавните форми на загуба на устойчивост не се наблюдава съвместно измятане на ригела и колоната, т.е. би могло да се приеме, че съгласно ECCS TC8 [8] прилагането на общия метод е допустимо за изследваните конструкции (измятането е както при изолиран номинално праволинеен елемент). Дори при критични множители, превишаващи многократно първия критичен множител, модалните странични отмествания на натиснатия пояс на колоната, са няколко пъти по-малки от тези на натиснатия пояс на ригела. Същевременно опорните сечения на ригела се завъртат (макар и не съвсем свободно) извън равнината на рамката поради усукването на колоната.

## 7. Коефициенти на загуба на устойчивост по общия метод

Условната стройност  $\bar{\lambda}_{op} = (\alpha_{ult,k} / \alpha_{cr})^{0,5}$  се използва за определяне на коефициента на загуба на устойчивост по общия метод  $\chi_{op}$ . Стойностите на условната стройност  $\bar{\lambda}_{op}$  и коефициента  $\chi_{op}$ , получени за трите рамки, са дадени в табл. 2. Тук поради малката стойност на нормалната сила в ригела е прието коефициентът  $\chi_{op}$  да се приема за равен на коефициента на измятане  $\chi_{LT}$ , който по посока на сигурността се определя по общата методика на т. 6.3.2.2 на [10], на база на отношението  $h/b < 2$  на размерите на напречното сечение на ригела, като се ползва крива на измятане „a” (прието е ригелът да се разглежда като горещовалцуван елемент, тъй като критичното сечение е на върха на заварената към него вута).

## 8. Гранични вертикални товари на рамките, определени с общия метод, GMNIA и натурните експерименти от [2]

В табл. 3 са дадени граничните вертикални товари  $P_{Rd}$  (равнодействащите на всички вертикални сили върху ригела), които рамките могат да понесат без да загубят обща устойчивост, определени съответно с помощта на общия метод, GMNIA и експериментите, проведени в [2]. Граничният вертикален товар по общия метод се определя по формулата

$$P_{Rd} = \chi_{op} \alpha_{ult,k} P_{Ed,1} \quad (1)$$

където  $P_{Ed,1}$  е равнодействащата на базовия вертикален товар (при  $F = 1$  kN).

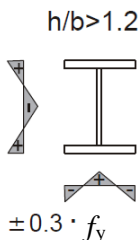
Таблица 3. Гранични вертикални товари  $P_{Rd}$  за рамките (kN)

Рамка	Общ метод $P_{Rd,GM}$	$P_{Rd,GMNIA}$ [2] $e_0 = 0,5L/250^*$	$P_{Rd,GMNIA}$ Остатъчни напрежения + $e_0 = L_{ch}/1000^{**}$	Експеримент $P_{Rd,Test}$ [2]
R1	21,5	22,9	26	28,5
R2	29,2	32,0	34,8 (близо до теоретична първа пласт. става – 36 kN)	42,5
R3	58,8	57,3	66	67,5

\* Дъгово-усуквателни еквивалентни геометрични несъвършенства на база на първа форма на загуба на устойчивост.

\*\* Дъгови несъвършенства съгласно EN1090-2 без отчитане на усуквателни несъвършенства.

В [2] GMNIA е проведен с програмата ABAQUS [14] при зададено еквивалентно геометрично несъвършенство на базата на първа форма на загуба на устойчивост с амплитуда  $e_0 = ke_{0,d} = kL/250$ , където  $L$  е отворът на рамката, а  $k = 0,5$  (стойността на  $k$  е на база на указанията в [7] за елементи, подложени на огъване). При това са включени и начални усуквателни еквивалентни геометрични несъвършенства, въпреки че в [10] се предписват само дъгови еквивалентни геометрични несъвършенства спрямо слабата ос. Стойността на  $e_{0,d}$  е приета на базата на кривата на изкълчване спрямо слабата ос, съответстваща на номиналния клас стомана на образците.



Фиг. 7. Остатъчни нормални напрежения, дължащи се на горещото валцуване [13]

В проведения тук GMNIA е използвана програмата ANSYS [14], като са отчетени остатъчните нормални напрежения от валцуването съгласно [13], а геометричните несъвършенства са дъгови, спрямо слабата ос на ригела (без усуквателна компонента), като

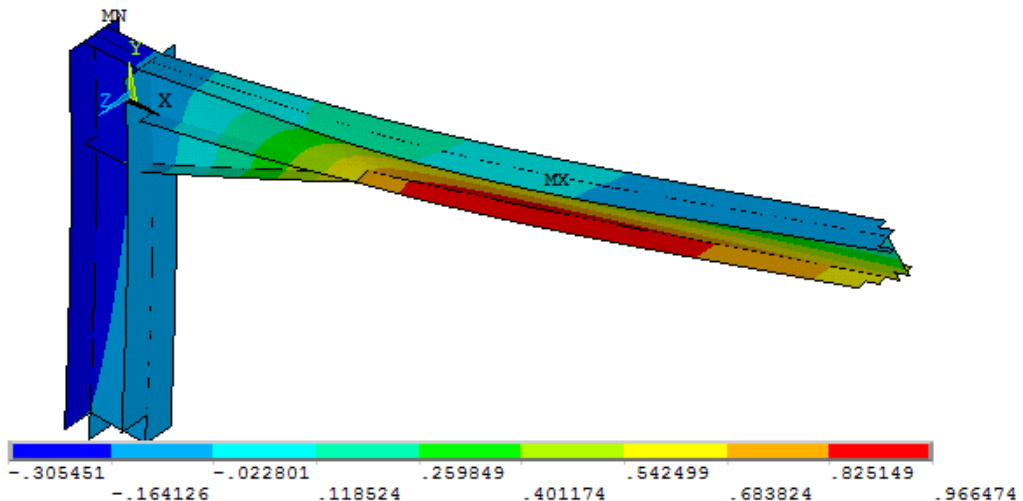
амплитудата на несъвършенството е приета  $L_{ch}/1000$ , където  $L_{ch}$  е хордата на дъгата (полувайната) на несъвършенството. Остатъчните нормални напрежения са с максимална абсолютна стойност от  $0,3f_{y,exp}$  (фиг. 7). Остатъчните напрежения се задават като начално състояние в програмата ANSYS, преди прилагането на външния товар. При моделирането са използвани черупкови крайни елементи SHELL181.

От табл. 3 е видно, че общият метод, приложен за рамката като цяло, винаги дава резултат по посока на сигурността в сравнение с експерименталните резултати и нелинейния анализ, проведен тук. Това до известна степен противоречи на направените в [2] изводи, основани на параметричен нелинеен анализ, които говорят за възможна фрапираща неконсервативност на общия метод за подобни рамки.

Натурните експерименти показват по-висока носеща способност в сравнение с аналитичните методи, което се дължи на по-малките реални несъвършенства на рамките в сравнение с нормираните. Това важи в най-голяма степен за рамка R2, при която експерименталният граничен товар превишава товара, съответстващ на теоретично образуване на първа пластична става.

Също така границата на провлачане на ригелите е определена на базата на пробни тела, взети от стелбата им, т.е. действителната граница на провлачане на поясите не е точно изяснена, което също вероятно допринася за разликите между експеримента и GMNIA.

По-прецизното отчитане на несъвършенствата в извършения тук GMNIA позволява доказването на по-висока носеща способност на рамките в сравнение с GMNIA, проведен в [2]. Страничните премествания при разрушение на ригелите, получени от GMNIA в настоящата работа (фиг. 8), са доста близки до експериментално получените в [2]. В [2] не се коментират хоризонталните премествания от GMNIA, но тук бе установено, че нелинейният анализ с еквивалентни геометрични дъгово-усуквателни несъвършенства от [2] дава силно преувеличени странични премествания при разрушение в сравнение с експериментите.



**Фиг. 8. Странични премествания (cm) при измятането на ригела на рамка R3 – GMNIA с начално дъгово несъвършенство съгласно EN 1090-2 и остатъчни напрежения от валцуването**

## 9. Изводи

Натурните експерименти, проведени в [2], показват по-висока носеща способност на рамките в сравнение с аналитичните методи (GMNIA и общ метод). Това се дължи на:

а) високото качество на изпълнение на експерименталните образци, водещо до по-малки реални несъвършенства на рамките в сравнение с нормативно заложените;

б) някои консервативни предпоставки на аналитичните методи (по-специално на общия метод и на GMNIA с огъвно-усуквателни еквивалентни геометрични несъвършенства).

Твърдението от [2] за неконсервативност на общия метод (в случая на ригели, които са по-склонни към измятане в сравнение с колоната) не се подкрепя от експерименталните резултати и от двата типа GMNIA, проведени в [2] и в настоящата статия. Напротив, общият метод дава с 12 – 20% по-консервативни резултати за изследваните три рамки, в сравнение с по-прецизния GMNIA с дъгови геометрични несъвършенства и остатъчни напрежения от валцуване, извършен тук. Консервативността на общия метод не е изненадваща, тъй като в общия метод се използват базовите стойности на коефициента на измятане  $\chi_{LT}$ , отнасящи се за константна моментова диаграма и „вилични” опори единствено в краищата на елемента (т.е. без допълнителна корекция на  $\chi_{LT}$ , отчитаща благоприятния ефект на непълнотата на моментовата диаграма).

Тезата от [2] за неконсервативност на общия метод (фиг. 5) е изказана не на базата на експерименталните резултати, а на базата на параметричен GMNIA, в който еквивалентните геометрични несъвършенства са дъгово-усуквателни, с амплитуда, равна на 1/500 част от отвора на рамката. Този подход води до генерирането на нереалистично големи усуквателни несъвършенства на ригела, респ. води до занижена носеща способност на рамките от GMNIA, особено при ригели с по-малка височина на напречното сечение, по-големи отвори и по-големи разстояния между страничните подпирания. Известно е, че амплитудите на усуквателната компонента на геометричното несъвършенство зависят не от отвора на рамката, а от височината на напречното сечение. Нещо повече, за горещовалцувани двойноТ-профили усуквателните геометрични несъвършенства са пренебрежими. Тук е показано, че задаването на несъвършенствата във вид на остатъчни напрежения плюс дъгови несъвършенства съгласно EN 1090-2 е по-коректният подход за извършване на GMNIA на рамки от горещовалцувани профили, водещ до по-добро приближение с експерименталните резултати. За разглежданите тук експериментално изследвани рамки двата подхода за задаване на несъвършенствата в GMNIA не водят до много големи разлики в носещата способност (до ок. 20%), което обаче се дължи на малкия отвор на ригела.

Очаква се приложението на общия метод да бъде регламентирано и в следващото издание на EN 1993-1-1, без да се внасят значителни корекции в процедурата на метода. Настоящото изследване, както и изследването на *Lechner* и колектив [11] дават надежда, че е възможно общият метод да се прилага при рамки с неукрепени срещу усукване рамкови възли. Необходимо е обаче изследванията за подобряване на процедурата на общия метод и за определяне на обоснован обхват на приложението му да продължат.

## ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1993-1-1:2005/NA:2011. Еврокод 3: Проектиране на стоманени конструкции. Част 1-1: Основни правила и правила за сгради, 2011.

2. *Василев, М.* Въпроси на устойчивостта на едноетажни стоманени рамкови конструкции. Докторска дисертация, УАСГ, 2018.
3. *Драганов, Н.* Еврокод 3: БДС EN 1993-1-1. Проектиране на стоманени конструкции на сгради. Коментари, примери, препоръки. София, 2016.
4. *Пенелов, Ч., Стойков, Ал., Цветкова, П.* Приложение на общия метод на EN1993-1-1 за оценка на общата устойчивост на стоманени елементи, попадащи в обхвата на приложение на стандартния метод за проверка на обща устойчивост при нецентричен натиск. Годишник на УАСГ, Том XLVI, Свитък V, 2013-2014.
5. *Biljaard, F., Feldmann, M., Naumes, J., Sedlacek, G.* The “general method” for assessing the out-of-plane stability of structural members and frames and the comparison with alternative rules in EN 1993 – Eurocode 3 – Part 1-1. Steel construction – design and research, Ernst & Sohn, 2010.
6. BS EN 1993-1-1:2005+A1:2014. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2014.
7. DIN EN 1993-1-1:2010-12. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings; German version EN 1993-1-1:2005 + AC:2009, 2010.
8. ECCS TC8 Stability: Field and limits of application of the General Method. ECCS, 2006.
9. EN 1090-2. Execution of steel structures and aluminium structures. Part 2: Technical requirements for steel structures, 2008.
10. EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3: Design of steel structures – part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, Brussels, 2005.
11. *Lechner, A., Greiner, R., Lindner, J.* Portal frame with complex boundary conditions – comparisons of general method with traditional methods according to Eurocode 3. Proceedings Vol. A, Eurosteel 2008, 5th European conference on steel and composite structures, S. 759 – 764, Graz, Austria, 2008.
12. *Marques, L.* Tapered steel members – lateral and lateral torsional buckling. PhD Thesis, Univ. Coimbra, PT, 2012.
13. *Simoës da Silva, L., Marques, L., Rebelo, C.* Numerical validation of the general method in EC3-1-1 for prismatic members. Journal of Constructional Steel Research 66, 2010.
14. [www.ansys.com](http://www.ansys.com), посетен на 11.03.2020 г.
15. [www.csiamerica.com](http://www.csiamerica.com), посетен на 11.03.2020 г.
16. [www.rheinische-industriekultur.com](http://www.rheinische-industriekultur.com), посетен на 11.03.2020 г.
17. [www.3ds.com](http://www.3ds.com), посетен на 11.03.2020 г.
18. *Zdravkov, L.* Using of General Method of Standard EN 1993-1-1 to Design of Self – Supporting Cone Roofs. 4<sup>th</sup> International Conference Advanced Construction, pp. 178-182. Lithuania, Kaunas University of Technology, 2014.

# APPLICATION OF THE GENERAL METHOD OF EN 1993-1-1 FOR EVALUATION OF THE ULTIMATE LOADS AT LATERAL-TORSIONAL BUCKLING OF STEEL PORTAL FRAMES – ANALYSIS OF EXISTING EXPERIMENTAL RESULTS

C. Penelov<sup>1</sup>

*Keywords:* steel portal frames, lateral-torsional buckling, general method, GMNIA

## ABSTRACT

The results of an existing experimental study of three steel portal frames destroyed by a lateral-torsional buckling of the rafters are analysed. The rafters and columns are hot-rolled. The beam-to-column joints are not restrained directly against torsion while the rafters are restrained against lateral translation only at the top flange level at the purlin locations (the bottom flange of the rafters is unrestrained against lateral translation). An existing GMNIA study with equivalent geometric initial imperfections (proportional to the 1<sup>st</sup> buckling mode) is also available for the studied portal frames.

Here, the load-bearing capacity of the frames is determined according to the general method of EN 1993-1-1, 6.3.4. In addition, a GMNIA with bow geometric imperfection of the rafters according to EN 1090 is carried out, and the residual normal stresses due to hot-rolling are taken into account in the analysis. The vertical load-bearing capacities of the frames obtained by the general method are compared with the results of the experimental study and with the results of the two types of GMNIA mentioned.

The existing experiments show a higher load capacity of the frames than the analytical methods (the two types GMNIA and general method). This is due to: 1) the high quality of execution of the tested frames, leading to smaller real imperfections of the frames than the codified imperfections, and 2) some conservative assumptions of the analytical methods (in particular the general method and GMNIA with equivalent geometric imperfections according to the 1<sup>st</sup> buckling mode).

The general method underestimates the vertical load-bearing capacity by 12 – 20% compared to the more precise GMNIA with bow geometric imperfections and residual stresses included.

Some conclusions from an earlier GMNIA-based parametric study showing the non-conservativeness of the general method (when the method is applied to the portal frame as a whole) have proved to be unfounded.

---

<sup>1</sup> Chavdar Penelov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: penelov\_fce@uacg.bg