

Получена: 15.09.2017 г.

Приета: 08.12.2017 г.

## ВИРЕНДЕЛОВИ КОЛОНИ С ФРИКЦИОННИ ДЕМПФЕРИ КАТО ПЪРВИЧНА СЕИЗМИЧНА ЗАЩИТА НА СЪЩЕСТВУВАЩИ СТОМАНЕНИ КОНСТРУКЦИИ

Г. Бончев<sup>1</sup>

*Ключови думи:* стоманени конструкции, сеизмична защита, виренделови колони, фрикционни демпфери

### РЕЗЮМЕ

Съществуващите стоманени конструкции (СК), проектирани в България преди въвеждането на системата Еврокод, обикновено се характеризират с ниска локална дуктилност и не изпълняват концепцията „силни-колони-слаби-греди“. Тези ограничения водят до необходимостта за изграждане на допълнителни системи за намаляване на сеизмичния риск.

Статията предлага нов подход за сеизмична защита на съществуващи СК, чрез виренделови колони с фрикционни демпфери. Анализирани са различни СК, като получените резултатите са представени и обобщени.

### 1. Въведение

Преди въвеждането на системата Еврокод в България стоманените конструкции са проектирани, без да се спазва концепцията „силни-колони-слаби-греди“, а напречните сечения на конструктивните елементи най-често са оразмерявани да работят в еластичен стадий. Това води до ниска локална дуктилност на елементите като те най-често съответстват на клас 3 според [1].

В тази статия авторът представя иновативно решение за първична сеизмична защита на съществуващи стоманени конструкции, използвайки виренделови колони с

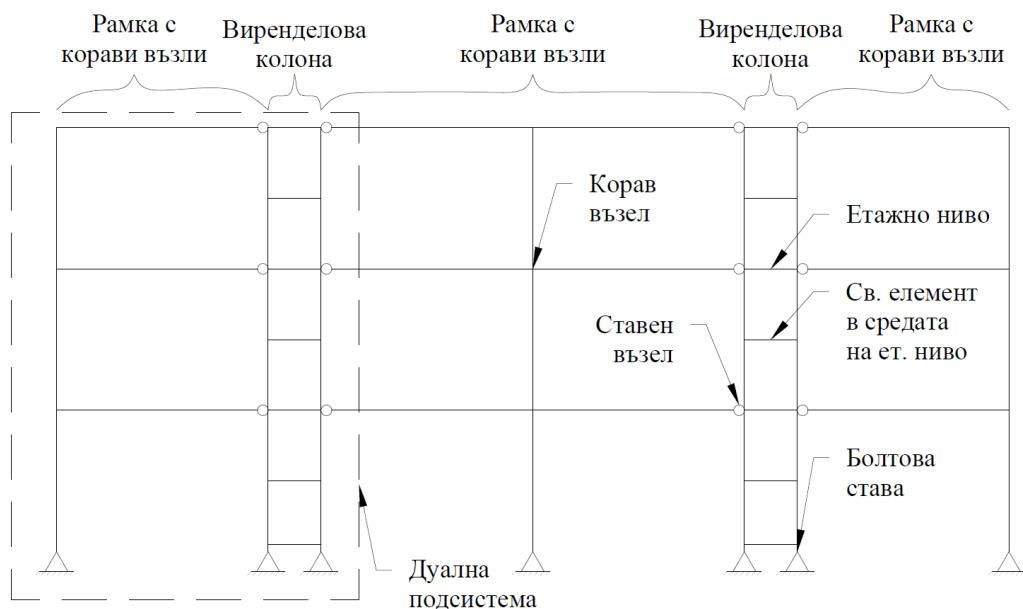
---

<sup>1</sup> Г. Бончев, инженер-конструктор в Линднер България ЕООД, София, жк „София парк“ 16Д, e-mail: g\_bonchev@yahoo.com

фрикционни демпфери. Анализирани са три- и шестетажна, четириотворни рамкови конструкции. Виренделовите колони са разположени симетрично от двете страни на първите вътрешни колони. Сеизмичното поведение на първоначалните и усилените конструкции е оценено като е използван методът на капацитивните спектри и като са проведени нелинейни статични (pushover) анализи със софтуера SAP2000 [2]. Получените резултати от анализа са представени и обобщени.

## 2. Приложение на системата „Рамки с виренделови колони” при проектиране за сеизмични въздействия

Системата „Рамки с виренделови колони“ (Linked columns frames) е разработена през последното десетилетие за приложение при конструкции на новоизграждащи се сгради [3 – 5]. Тя представлява смесена, дуална система, вж. фиг. 1, при която две подсистеми работят паралелно, за да осигурят желаното сеизмично поведение. Основната подсистема за поемане на хоризонтални натоварвания, виренделовите колони, са съставени от два близко разположени вертикални дяла, свързани по височината си с подменяеми хоризонтални къси сеизмични свързващи елементи. Свързващите елементи са дисипативните елементи и са проектирани да пластифицират по време на сеизмично въздействие, като същевременно контролират преместванията и намаляват силите, предавани на останалите конструктивни елементи. Предпочитани са болтовите, фланцевеи съединения на свързващите елементи към дяловете на виренделовите колони, което прави възможно бързото им подмяне в случай на повреда.



Фиг. 1. Система на рамка с виренделови колони

Вторична подсистема за поемане на хоризонталните натоварвания е рамката с корави възли, която главно участва в поемането на вертикалните товари, но също осигурява

гурява и допълнителна коравина при хоризонтални натоварвания. Тази коравина е важна за осигуряването на самоцентриращ механизъм при премахване и подмяна на повредени свързващи елементи.

При проектиране на рамки с виренделови колони трябва да се вземат предвид поне три гранични състояния [3 – 5]:

- Еластично поведение при натоварване от вятър и земетресения с ниска интензивност. Основната коравина за поемане на хоризонталното натоварване се осигурява от виренделовите колони;
- Бързо възстановяване на дейността в сградата при силни земетресения. Свързващите елементи развиват пластични деформации, докато останалата част от конструкцията работи в еластичен стадий. Сградата може да бъде използвана незабавно след земетресението, тъй като системата за поемане на вертикалните товари (рамката с корави възли) е неповредена;
- Ограничаване на повредите при сеизмични въздействия надвишаващи проектните. Възможно е формиране на пластични стави в стоманените рамки, които са вторична линия на защита при големи хоризонтални натоварвания.

### **3. Нормативни документи и подходи за проектиране на виренделови колони с фрикционни демпфери**

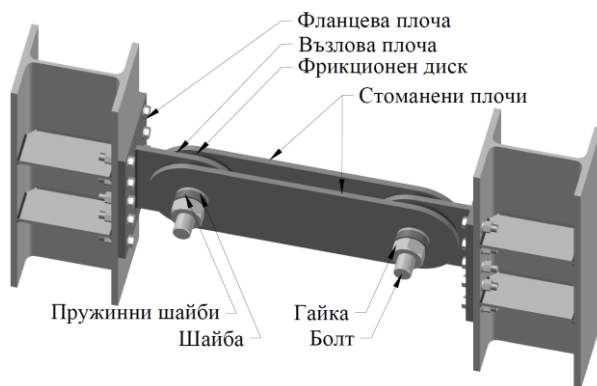
Свързващите елементи трябва да бъдат проектирани за носимоспособност и дуктилност. Носимоспособността е свързана с максималния капацитет на конструктивния елемент да поема определено натоварване, а дуктилността с максималните деформации след достигане на границата на провлачане, без загуба на значителна част от якостта.

Свързващите елементи във виренделовите колони действат като конструктивни бушони, осигуряващи местна пластичност, подобно на свързващите елементи в рамките с нецентрично включени връзки (РНЦВВ). В сравнение с непрекъснатите греди и стандартните заварени детайли при РНЦВВ, свързващите елементи са свързани към дяловете на виренделовите колони, чрез болтови фланцеви съединения, позволяващи лесната им подмяна при повреда.

Фланцевите съединения в краищата на свързващите елементи могат да бъдат проектирани според Еврокод 3 [6], като обикновено се използват високоякостни болтове, работещи на опън и срязване. Възлите между свързващите елементи и вертикалните дялове на виренделовата колона, както и самите вертикални дялове, следва да работят в еластичен стадий по време на сеизмично въздействие. Те трябва да бъдат проектирани капацитивно в съответствие с изискванията на Еврокод 8 [7].

В тази статия авторът предлага нов подход при проектирането на виренделови колони. С цел да се избегнат повредите в стандартните къси стоманени греди с 2Т-сечение като сеизмични свързващи елементи са използвани ротационни фрикционни демпфери (РФД). Описание на устройството на демфера може да се намери в [8, 9].

Ротационните фрикционни демпфери притежават доказан капацитет за дисипиране на енергия, лесни са за производство, монтиране и поддръжка при сравнително ниски цени. Избрана е конфигурация на РФД с два фрикционни възела, която включва две хоризонтални стоманени плочи и фрикционни дискове, поставени между тях, възловите плочи, вж. фиг. 2. Допълнително предимство на РФД с избраната конфигурация е неограниченият капацитет на завъртане след достигане на границата на приплъзване.



**Фиг. 2. Устройство и компоненти на фрикционен демпфер, производител DampTech, Дания**

Норми за проектиране на конструкции с фрикционни демпфери все още не са включени в [6], но докладите на FEMA [10, 11], ASCE 41-13 [12] и европейския стандарт EN 15129 [13] могат да бъдат ползвани като основа за тяхното проектиране.

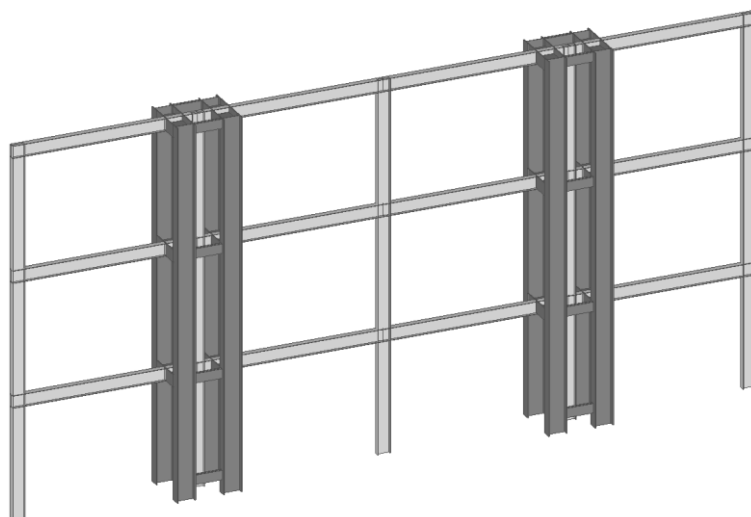
#### **4. Параметрично изследване на конструктивната система**

За да се определи ефикасността на виренделовите колони с фрикционни демпфери за усилване на стоманени конструкции, подложени на сеизмични въздействия, две стоманени рамки, проектирани по [14], са анализирани чрез използване на софтуера SAP2000 [2]. Разглежданите конструкции са три- и шестетажни четириотворни стоманени рамки с 6,0 m дължина на отвора и етажна височина 4,0 m.

Възлите греда-колона са предвидени да бъдат заварени, а базите на колоните, запънати. Напречните сечения на конструктивните елементи са проектирани като съставени заварени 2Т-сечения и голяма част от тях съответстват на клас 3 според [1], което не удовлетворява изискванията за локална дуктилност на [7]. Концепцията „Силни-колони-слаби-греди“ не е разглеждана в [14] и образуване на пластични стави в колоните може да бъде очаквано поради претоварването им, което може да застраши общата устойчивост на конструкцията. Допълнително, дефинирането на изчислителните спектри на реагиране по действащите в средата и края на 80-те години норми е различно от това в [7].

Виренделовите колони се разполагат симетрично от двете страни на първите вътрешни колони на стоманената рамка, вж. фиг. 3. Предаването на товарите от основната конструкция към ВК се осъществява с къси траверси, свързващи ригелите на рамката с вертикалните дялове на ВК. Траверсите са с 2Т-сечение завъртяни, така че да поемат и предават хоризонталните товари по силната си ос. Вертикалните дялове на ВК са НЕВ600 и НЕВ800, съответно за три- и шестетажната конструкция, а осовото разстояние между тях е 2,0 m. Избрани са РФД с капацитет 40 kNm на триещ се възел и са разглеждани три различни конфигурации, вж. фиг. 4:

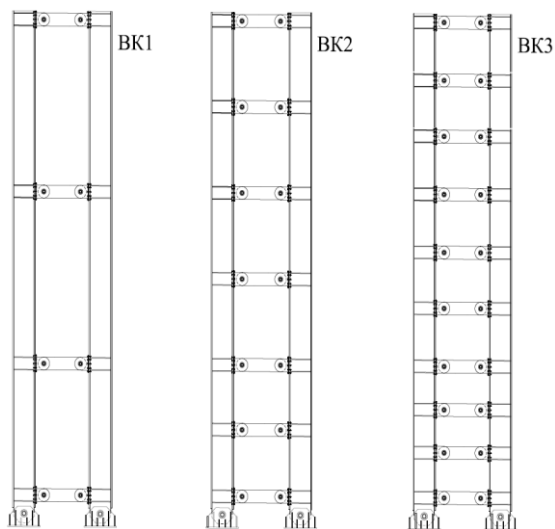
- с един РФД (ВК1) на етажно ниво, разположен на нивото на ригелите;
- с два РФД (ВК2) на етажно ниво, разположени на нивото на ригелите и в средата на етажната височина;
- с три РФД (ВК3) на етажно ниво, разположени на нивото на ригелите и в третините на етажната височина.



**Фиг. 3. Модел на триетажна рамкова конструкция, усиlena с ВК с ФД**

С цел да се намалят повредите и бързото възстановяване на дейността в сградата, базите на вертикалните дялове на ВК са предвидени да бъдат ставни. За да се осигури допълнителна коравина, РФД са добавени в близост до базите на вертикалните дялове.

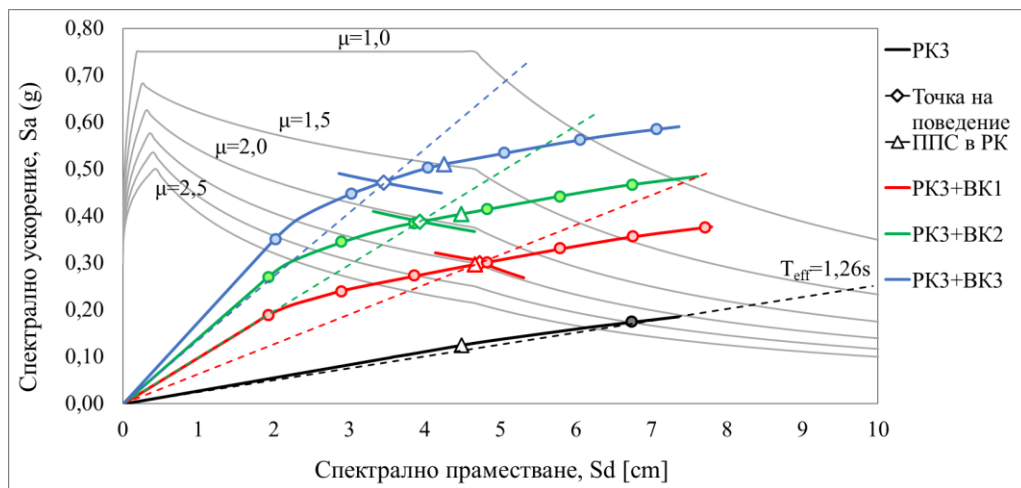
Сеизмичната оценка на поведението на неусилените рамки и техните усиленни разновидности е осъществена по „Метода на капацитивните спектри“, основан на нелинейния статичен (pushover) анализ. Пластичните характеристики на материалите и на конструктивните елементи, поведението на зоната от стеблото на колоната във възела греда-колона и ефектите от втори ред са отчетени. Пластичните стави в ригелите и колоните са дефинирани с двулинейна зависимост момент-завъртане с 3% уякчаване. Поведението на фрикционните стави е моделирано като е използван моделът на Bouc-Wen в [2].



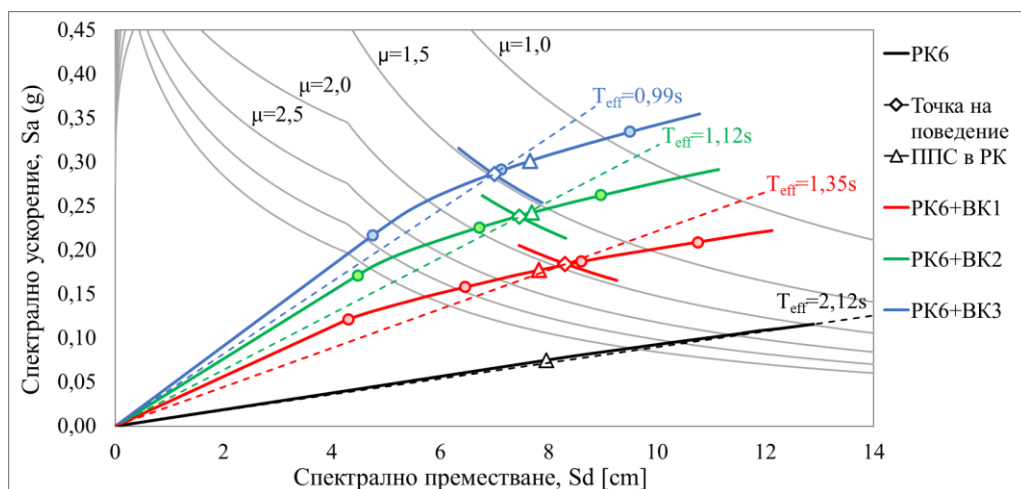
**Фиг. 4. Варианти на разпределението на РФД във ВК**

Сеизмичната маса на конструкцията включва 100% от постоянните и 24% от полезните товари. Предвид регулярността на конструкциите и техните относително малки височини, разпределението на хоризонталните сили по височина е пропорционално на деформираната схема при първа собствена форма на трептене. За да се трансформират системите с много степени на свобода в еквивалентна система с една степен на свобода е използван N2 метод [15]. Сеизмичните въздействия, на които конструкциите са подложени за почви тип С и почвено ускорение 0,23 g, са дефинирани с нееластични спектри на реагиране във формат ускорение-преместване за постоянни коефициенти на дуктилност  $\mu$ .

## 5. Анализ и съпоставка на резултатите, получени от численото моделиране



Фиг. 5. Сеизмично поведение на неусилената и усилените триетажни рамки



Фиг. 6. Сеизмично поведение на неусилената и усилените шестетажни рамки

Поведението на първоначалните рамкови конструкции (РК) и техните три усилене разновидности (три варианта на разпределение на РФД) са представени на фиг. 5 и 6 във формат спектрално ускорение-спектрално преместване, а характеристиките им са обобщени в табл. 1.

Първата пластична става се появява при базите на първите вътрешни колони при преместване във върха на конструкцията 0,47% и 0,45%, съответно за три- и шестетажната рамка, последвана от пластична става в базата на средната колона и в краищата на ригелите от първия етаж. Това поведение е очаквано, поради ограничения ротационен капацитет на напречните сечения на колоните и високите напрежения при базите им.

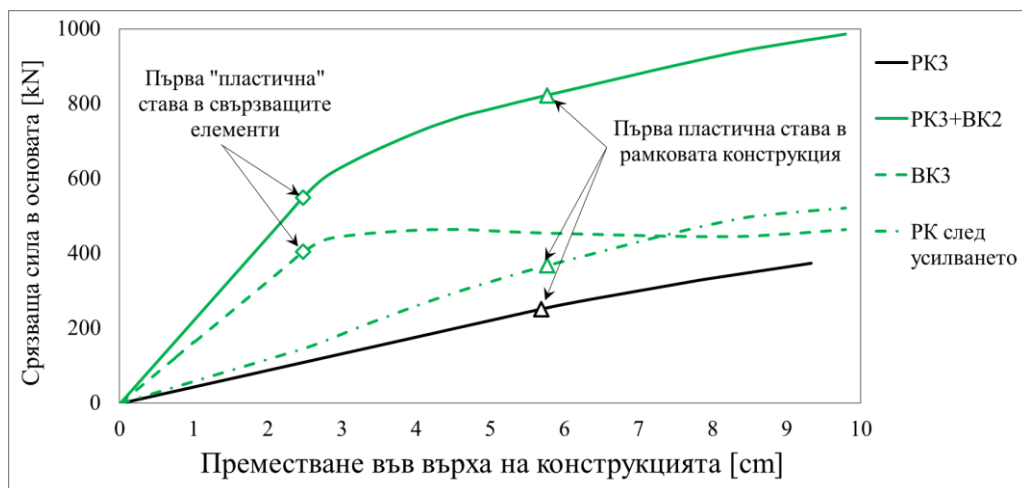
Усилените системи притежават по-голяма коравина, което се приема за предимство, тъй като при проектиране на рамкови конструкции преместванията често са меродавни. Фрикционните демпфери „пластифицират“ (приплъзват) първо при първия етаж и за трите вида разпределение по височина на ВК, както за три-, така и за шестетажната РК. С повишаване на преместванията се наблюдава приплъзване и на РФД по височина на ВК, което осигурява необходимото дуктилно поведение, а рамковата конструкция остава неповредена, докато средната колона не пластифицира при базата си. Във вертикалните дялове на ВК не се наблюдава образуване на пластични стави.

**Таблица 1. Конструктивни характеристики на изследваните конструкции**

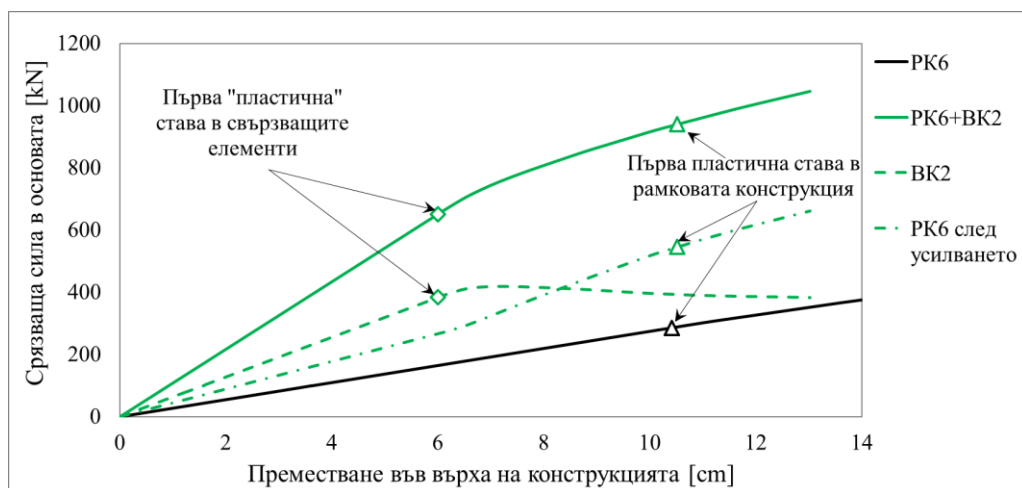
	Три етажа				Шест етажа				
	РК	РК+ВК1	РК+ВК2	РК+ВК3	РК	РК+ВК1	РК+ВК2	РК+ВК3	
ОПВК <sup>1</sup> при първа пласт. става [%]	РК	0,47	0,50	0,48	0,46	0,45	0,44	0,42	0,44
	РФД	-	0,21	0,21	0,22	-	0,24	0,26	0,27
ОПВК при целево преместване [%]		0,78	0,51	0,42	0,37	1,41	0,94	0,85	0,80
Основен период на конструкцията, $T$ [s]		1,20	0,66	0,55	0,49	2,08	1,25	1,07	0,98
Ефективен период на конструкцията, $T_{eff}$ [s]		1,26	0,80	0,64	0,54	2,12	1,35	1,12	0,99
Целево преместване [cm]		9,32	6,08	4,98	4,39	16,89	11,32	10,21	9,64
Срязв. сила в сновата [kN]		374	608	780	945	442	716	922	1102
Коеф. на дуктилност, $\mu$		1,64	2,45	2,04	1,72	1,62	1,93	1,67	1,48
Ефективно затихване, $\xi$		10,70	14,83	13,02	11,19	10,58	12,45	10,87	9,53

Капацитивните криви на неусилените и усилените с по два демпфера на етажно ниво конструкции са показани на фиг. 7 и 8 във формат преместване при върха-срязваща сила в основата. Показан е също и приносът на отделните подсистеми към поведението на усилените конструкции. Първите пластични стави в усилените РК се образуват при малко по-голямо преместване в сравнение с тези при неусилените, но при по-голяма срязваща сила в основата. Това е вследствие на увеличаването на коравината и намаляването на основния (първи) период на усилената конструкция.

<sup>1</sup> Относително преместване във върха на конструкцията



Фиг. 7. Принос на отделните подсистеми към общата коравина на триетажната РК

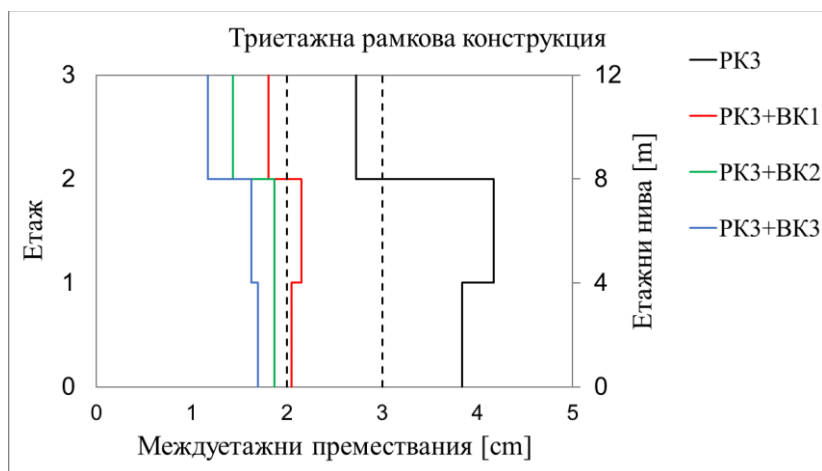


Фиг. 8. Принос на отделните подсистеми към общата коравина на шестетажната РК

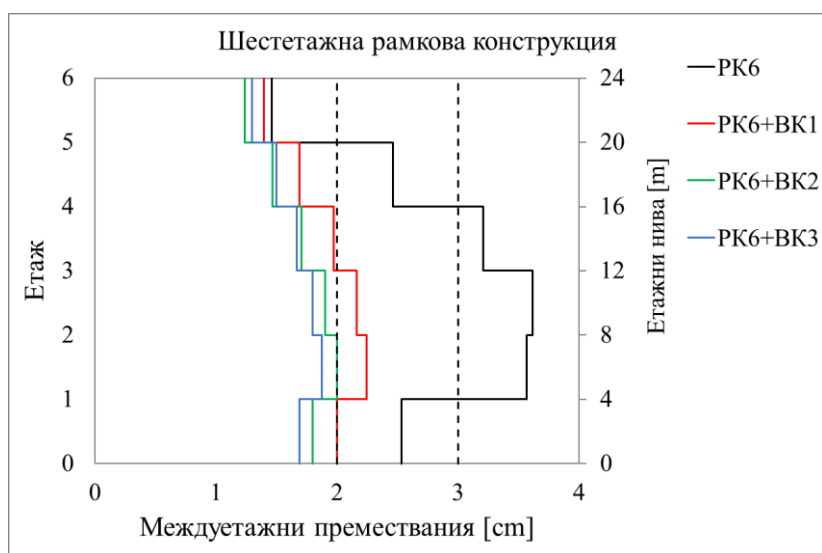
Междуетажните премествания на неусилените и усилените конструкции са показани на фиг. 9 и 10. На графиките с пунктир са посочени и двете най-строги гранични стойности за ограничение на междуетажните премествания съгласно [7]:

- $0,005h = 2,0$  cm;
- $0,0075h = 3,0$  cm.

След усилване, вследствие на увеличената коравина на конструкцията, междуетажните премествания намаляват значително, така че да удовлетворят изискванията на [7].



Фиг. 9. Междуетажни премествания на неусилената и усилените триетажни РК



Фиг. 10. Междуетажни премествания на неусилената и усилените шестетажни РК

## 6. Изводи и заключения

В статията е изложена концепцията за използване на Виренделови колони с фрикционни демпфери като първична сеизмична защита. Системата включва ротационни фрикционни демпфери, свързващи два близко разположени вертикални дяла на ВК. Демпферите изпълняват ролята на конструктивни бушони, като чрез триене дисипират голяма част от енергията, приложена върху конструкцията вследствие на сеизмични въздействия. Виренделовите колони внасят допълнителна коравина към основната конструкция, контролират междуетажните премествания и защитават от повреди първоначалната конструкция.

Получените резултати от нелинейните статични (pushover) анализи на три- и шестетажните усиленни конструкции показват възможностите и приложимостта на представената концепция. Относителното преместване във върха на конструкцията при достигане на „целевото“ преместване намалява от 0,78% до 0,37% (ВК3) при триетажната и от 0,70% до 0,40% (ВК3) при шестетажната конструкция. Дуктилното поведение на конструктивните системи с два (ВК2) и три (ВК3) демфера на етажно ниво е постигнато без да настъпят повреди в първоначалната конструкция.

Изискват се допълнителен нелинеен динамичен анализ и последващи параметрични изследвания на конструктивната система, за да се потвърдят представените числени резултати, а също и за по-доброто предвиждане на поведението на стоманени рамкови конструкции, усиленни с виренделови колони с фриксионни демпфери.

## ЛИТЕРАТУРА

1. CEN. EN 1993-1-1. Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2005.
2. Computers and Structures, Inc., SAP 2000 V17, Berkeley, CA, 2015.
3. Lopes, A. P., Dusicka, P. “Seismic behavior and design of the linked column steel frame system for rapid return to occupancy”. NEES Reserch Report, Portland State University, 2014.
4. Malakoutian, M., Berman, J. W., Dusicka, P., Lopes, A. “Seismic performance and design of linked column frame system (LCF)”. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012.
5. Dusicka, P., Berman, J. W., Purasinghe, R. “Steel frame lateral system concept utilizing replaceable links”. Proceedings of the 2009 NZSEE Annual Technical Conference, New Zealand Society of Earthquake Engineering, Christchurch, NZ, 2009.
6. CEN. EN 1993-1-8. Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, 2005.
7. CEN. EN 1998-1. Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, 2004.
8. Mualla, I. H., Belev, B. “Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation”. Engineering Structures, 24(3), pp. 365–371, 2002.
9. Mualla, I. H., Nielsen, L. O., Belev, B., Liao, W. I., Loh, C. H., Agrawal, A. “Numerical predictions of shaking table tests on a full-scale friction-damped structure”. Proceedings of the 12<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, London, 2002.
10. FEMA 273. NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, 1997.
11. FEMA 356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, 2000.
12. ASCE 41-13. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, 2013.
13. CEN. EN 15129. Anti-seismic devices, 2009.
14. Норми за проектиране на стоманени конструкции, 1987.
15. Fajfar, P. “A nonlinear analysis method for performance based seismic design”. Earthquake Spectra, vol. 16, No. 3, pp. 573-592, EERI, 2000.

# LINKED COLUMNS WITH FRICTION DAMPERS AS PRIMARY SEISMIC PROTECTION OF EXISTING STEEL STRUCTURES

G. Bonchev<sup>1</sup>

*Keywords: steel structures, seismic retrofitting, linked columns, friction dampers*

## ABSTRACT

The existing steel structures designed in Bulgaria, before introducing the Eurocode system, usually can be characterized with low local ductility and do not impose the “strong-column-weak-beam” concept. These disadvantages lead to the necessity of introducing additional systems for decreasing the seismic risk.

The paper proposes a new technique for seismic protection of existing steel structures using linked columns with friction dampers. Different steel structures have been analyzed and the results obtained from the analyses are presented and summarized.

---

<sup>1</sup> Georgi Bonchev, Structural Engineer at “Lindner Bulgaria” EOOD, 16D Sofia Park, Sofia, e-mail: g\_bonchev@yahoo.com