

СЕЙЗМИЧНО УСИЛВАНЕ НА СТОМАНЕНИ РАМКИ С ВЛАГАНЕ НА BRB-ДИАГОНАЛИ

Борислав Куков¹

SEISMIC RETROFIT OF STEEL FRAME INCORPORATING BRBS

Borislav Kukov¹

Резюме:

Съществуващите стоманени конструкции, проектирани по норми от по-старо поколение, обикновено са изложени на висок сеизмичен риск. Ограниченият капацитет на локална дуктилност и липсата на йерархия на носимоспособностите на елементите на конструкцията могат да станат причина за ниска глобална дуктилност, което от своя страна може да доведе до неприемливи сеизмични повреди и уязвимост към вторични трусове.

Докладът предлага подход за усилване на съществуващи стоманени конструкции чрез чрез влагане на диагонали, осигурени срещу изкълчване (BRB). При тях носимоспособностите на опън и на натиск са изравнени. Основният компонент на един BRB-диагонал е дуктилното стоманено ядро. Обикновено стоманеното ядро е обвито по цялата си дължина от стабилизираща обвивка (кожух). Добавените BRB-диагонали заедно със съществуващата рамка с корави възли формират дуална система за поемане на хоризонталните сеизмични сили, в която вертикалните връзки с BRB-диагоналите действат като основна система за поемане на сеизмичните сили и дисипация на входящата сеизмична енергия, докато съществуващата рамкова конструкция с корави възли участва основно в поемането на гравитационните товари. В това проучване са проведени числени изследвания на репрезентативна равнинна рамка, за да се проучи ефективността на предложения подход. Резултатите, получени от анализа по спектрален метод, са представени обобщено. Те показват, че влагането на BRB-диагонали е удачен метод за усилване на съществуващи рамкови конструкции.

Ключови думи:

стоманени конструкции, BRB-диагонали, сеизмично усилване

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Диагоналите, осигурени срещу изкълчване (BRB-диагонали), са широко използвани като високодуктилни сеизмични устройства. Първата сграда, в която са използвани BRB-диагонали, е реализирана в Токио още през 1989 г. От тогава до сега са реализирани още хиляди сгради в Япония, САЩ, Тайван, Китай, Нова Зеландия и други страни. Основната им функция е да увеличат коравината на конструкцията за хоризонтални въздействия и да намалят нееластичните деформации в подсистемата от рамки с корави възли, като по този

¹ Борислав Куков, Доторант, УАСГ – София, катедра МДПК, borislavkukov@abv.bg

начин да се предотвратят тежки повреди и разрушаване. Влагането на BRB-диагонали в съществуващи конструкции може да намали и неконструктивните повреди. При сеизмични въздействия BRB-диагоналите осигуряват стабилен източник на дисипиране на енергия чрез своето хистерезисно поведение, докато съществуващите рамки се очаква да останат еластични и да осигурят самоцентриращо действие за конструкцията на сградата.

Предложен е подход за усиляване с влагане на допълнителни BRB-диагонали на съществуваща стоманена рамкова конструкция. При проектирането на тази модифицирана дуална (смесена) система трябва да се вземе под внимание фактът, че стоманените конструкции от по-старо поколение обикновено имат ограничена налична дуктиленост и не отговарят на изискванията за капацитивно проектиране.

В доклада е анализирана шестетажна петотворна стоманена рамка. Добавените BRB-диагонали са разположени симетрично в две вътрешни междуосия на конструкцията. Сеизмичното реагиране на усилената рамка е проведено по спектралния метод със софтуера SAP 2000 (C&S, Inc. 2015), като са използвани и резултатите на Bonchev G., Belev B., Mualla I. (2018) [3], който оценява сеизмичното реагиране на същата съществуваща рамка чрез статичен нелинеен Pushover-анализ.

2. BRB-ДИАГОНАЛИ. ПРЕДИМСТВА И ПРИЛОЖЕНИЕ В СЕИЗМИЧНОТО ПРОЕКТИРАНЕ

Основната концепция за диагоналите, осигурени срещу изкълчване, се появява още през 70-те години на миналия век, когато ограничени експериментални резултати са докладвани от няколко изследователи в Япония и Индия. В близкото минало, цикличното поведение на BRB е широко изследвано чрез експериментални изпитвания. Тези експерименти показват стабилни хистерезисни примки с почти билинейна форма, значително кинематично и изотропно уякчаване, подобно на други системи, които дисипират енергия чрез своето хистерезисно поведение, което е основното им предимство пред традиционните стоманени диагонали на вертикалните връзки. BRB-диагоналите в съчетание с широко използваните рамки с корави възли създават дуална (смесена) конструктивна система (фиг.1), чието поведение е по-сложно, но тя може да осигури стабилно дисипиране на енергия при циклично натоварване.

Допълнително вложените BRB-диагонали са с Λ -образна конфигурация. Съединенията в краищата им са болтови. Рамките с корави възли основно поемат вертикалните натоварвания, но също така са и вид втора защитна линия, която осигурява допълнителна коравина за хоризонтални сили. Тази коравина е от съществено значение за осигуряване на възстановяваща (центрираща) сила при силно сеизмично въздействие.

За постигане на стабилни и надеждни характеристики на системите с BRB-диагонали, при проектиране трябва да се вземат предвид следните критерии, обобщени от T. Takeuchi и A. Wada (2018)[2]:

- Изисквания за стабилно хистерезисно поведение:

Основно BRB диагоналите трябва да се проектират за носимоспособност и устойчивост, имайки предвид локалното и глобалното поведение на дуктилното ядро, съединенията им и всички останали части.

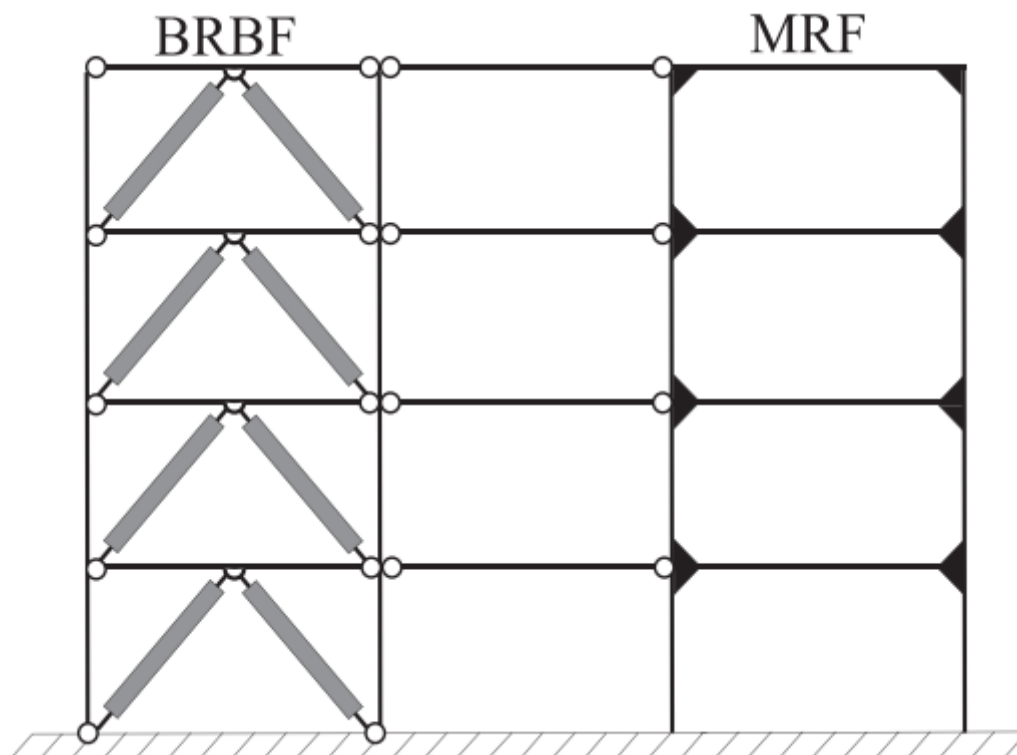
- Локални несъвършенства в стабилизиращата обвивка:

Нарушаването на сцеплението или празнина между стоманеното ядро и кожата могат да доведат до компрометиране на ядрото, когато BRB работи на натиск.

- Глобална загуба на устойчивост, заедно със съединенията.

- Нарастващ деформационен капацитет до разрушаване:

Нарастващият деформационен капацитет на BRB-диагоналите, подложени на осови деформации с постоянна амплитуда, може приблизително да бъде моделиран следвайки правилата на Manson-Coffin.

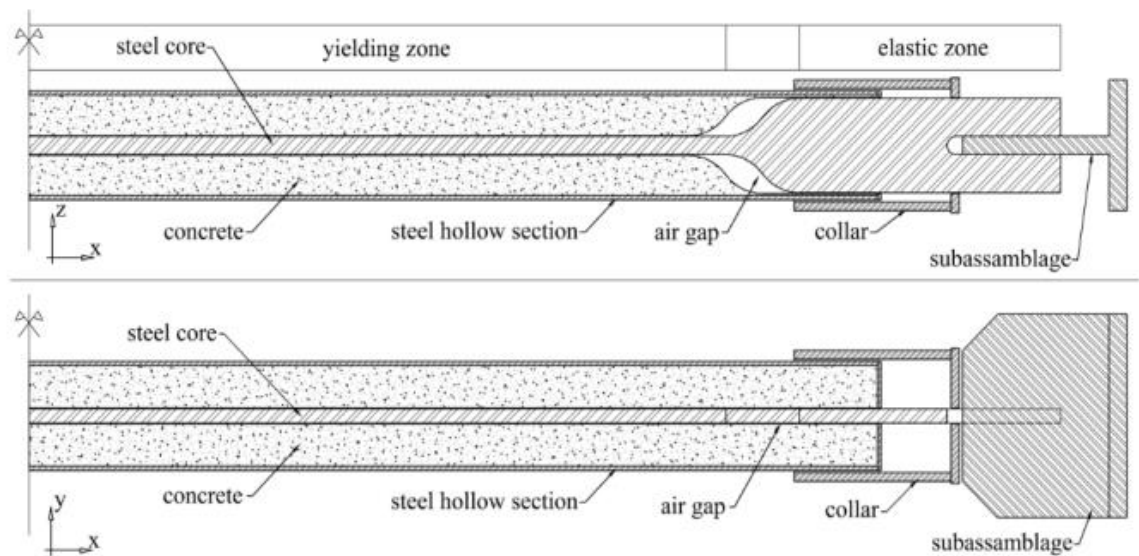


Фигура 1. Дуална система, комбинираща BRB-диагонали и рамка с корави възли.

3. ОПИСАНИЕ И РАЗПОРЕДБИ НА НОРМИТЕ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ ЗА ДУАЛНИ СИСТЕМИ С BRB-ДИАГОНАЛИ

Диагоналите, осигурени срещу изкълчване, са изследвани задълбочено чрез експериментални изпитвания и тяхната висока дуктилност е потвърдена от много изследвания. Въпреки това Еврокод 8 (EC8) не предоставя никакви правила за проектиране на стоманени рамки с BRB-диагонали. М. Bosco (2018) [1] представя изчислителна процедура за проектиране на стоманени рамки, оборудвани с BRB-диагонали. Предложената процедура за проектиране се получава чрез модифициране на правилата за проектиране, посочени в Еврокод 8, за стоманени вертикални връзки с Λ -образни диагонали. В резултат на това се счита, че получената процедура за проектиране е в съответствие с основните правила и изисквания на EC8 [5].

BRB-диагоналите са сеизмични устройства, състоящи се основно от стоманено ядро, което поема само осови усилия и стабилизираща обвивка, която възпрепятства цялостното изкълчване. Както е показано на фиг. 2, типичната обвивка се състои от стоманен затворен профил, запълнен с разтвор, който обвива дуктилното ядро. В краищата на ядрото по дължина има зона без запълване (кух участък), което е съществена особеност на съвременните BRB-диагонали. Така се ограничава пренасянето на осови сили към стабилизиращата обвивка, като контактната повърхнина на ядрото е с ниско триене, благоприятстваща напречното разширяване на стоманеното ядро вследствие на ефекта на Пасон. В резултат на тези мерки дисипативните характеристики на BRB-диагоналите са отлични и са сравними с други високодуктилни системи.



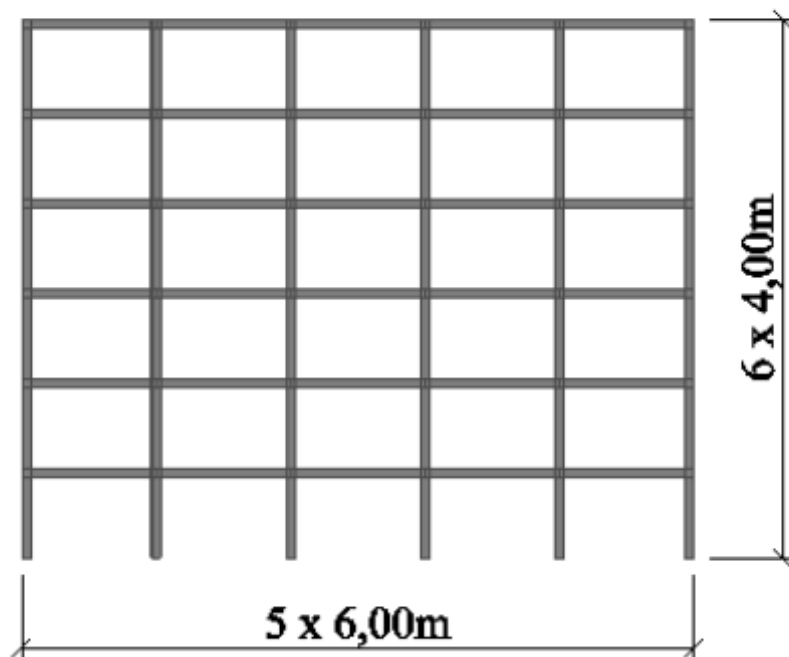
Фигура 2. Надлъжни разрези на типичен BRB-диагонал, произведен от Star Seismic, László Gergely, Vigh, Ádám Zsarnóczay, Tamás Balogh [10].

BRB диагоналите се монтират към основната конструкция посредством болтови съединения.

4. ПРЕГЛЕД НА ИЗСЛЕДВАНАТА КОНСТРУКЦИЯ, ПРИЛОЖЕНИ ПОДХОДИ И МЕТОДОЛОГИЯ

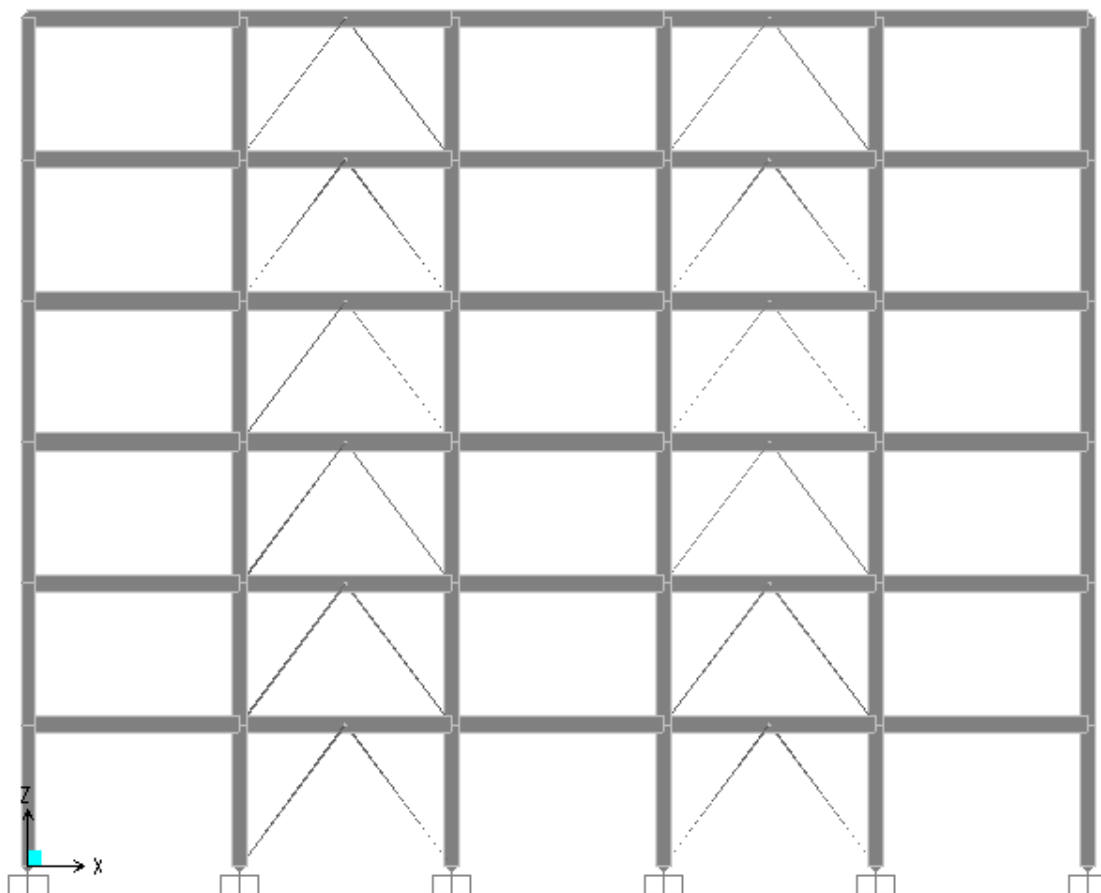
Анализирана е шестетажна пететоворна стоманена рамка, проектирана съгласно Българските норми за проектиране на стоманени конструкции НПСК-87 (1987) [8], за да се изследва ефективността на усилването с добавяне на BRB-диагонали.

Рамковите възли между греди и колони се приемат за корави, а базите на колоните се приемат за напълно запънати. Напречните сечения на елементите са съставени от заварени 2Т-профили, в съответствие с преобладаващата проектантска практика за периода 1980-1990 г. Повечето от тези напречни сечения могат да бъдат класифицирани като напречни сечения клас 3 съгласно EN 1993-1-1 (CEN, 2005) [4], които не отговарят на изисквания за локална дуктилност на EN 1998-1 (2004) [6]. Характерно за тогавашните български норми е, че конструкциите на рамки с корави възли, са проектирани за изчислителни сеизмичните сили, съответстващи на много високи стойности на коефициента на поведение ($q = 4 \div 5$). Не е имало изискване за капацитивно проектиране от типа „Силни колони - слаби греди“, поради което може да се очаква образуване на пластични стави в колони и цялостна нестабилност на конструкцията. Също така нормите за сеизмично проектиране от онова време са използвали процедура за ограничаване на междуетажните премествания, която в някои случаи може да доведе до неприемливи премествания и повреди. В допълнение дефинициите на изчислителния спектър на реагиране и сеизмичните маси са различни от тези в CEN EN 1998-1 (2004)[6].



Фигура 3. Геометрия на представителната стоманен рамка с корави възли.

За максимална ефективност и за избягване на възможни проблеми с фасадното ограждане BRB-диагоналите са разположени симетрично в първите две вътрешни междуосия на рамката, както е показано на фигура 4. Приетата за изчисленията площ на ядрото на BRB-диагоналите за първия и втория етаж е 50cm², за втория и третия е 40cm² и 30cm² за петия и шестия етажи. Напречното сечение е въведено в изчислителния софтуер като плътно кръгло сечение. За опростяване на резултатите не се разглежда конструкцията в перпендикулярно направление.



Фигура 4. Модел на 6-етажна 5-отворна рамка с корави възли, сеизмично усилена с BRB-диагонали.

Прехвърлянето на хоризонталното натоварване от съществуващата конструкция към BRB-диагоналите се осъществява посредством болтовите съединения в краищата им. И преходният, и съединителният сегменти остават еластични, защото напречното им сечение е по-голямо от това на дуктилното ядро. Препоръчва се съединенията да бъдат болтови, с ограничено заваряване на място, за да се минимизира нагряването на гредите на рамката, които са натоварени с гравитационни товари по време на операциите по сеизмичното усилване.

Сеизмичното реагиране на рамката с корави възли и нейния усилен аналог е оценено чрез спектрален анализ, като са взети предвид и резултатите получени от статичния нелинеен pushover-анализ, проведен в [3]. Нелинейността на материала и P-delta ефектите са взети под внимание.

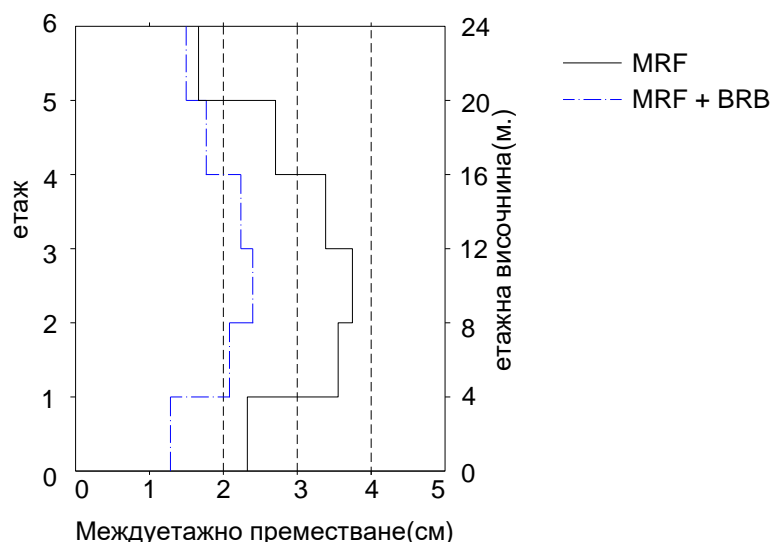
Изчислителният спектър на реагиране е получен чрез редуциране на еластичния спектър на реагиране с коефициента на поведение $q=2$. BRB-диагоналите са моделирани като пръти с еквивалентна площ на напречното сечение A_{eq} , определена по метода, представен в [1].

Почвените условия отговарят на почва тип C (CEN EN 1998-1, 2004) [6] и изчислително почвено ускорение, равно на $0,25g$.

5. РЕЗУЛТАТИ, ПОЛУЧЕНИ ОТ ЧИСЛЕНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Първата пластична става в неусилената рамка с корави възли се получава при базата на вътрешните колони, при относително преместване на нивото на покрива 0,53%, непосредствено следвано от провлачване в гредите на първия етаж [3]. Това поведение се очаква поради ограничения ротационен капацитет на напречните сечения на колоните и големите напрежения в техните краища. Установено е, че усилените с BRB диагонали системи са с по-висока странична коравина, което се счита за предимство, като се има предвид, че при сеизмичното проектиране на традиционните стоманени рамки с корави възли обикновено е меродавен критерият за ограничаване на повредите (междуетажните премествания). Допълнителното влагане на BRB-диагоналите в съществуващата конструкция чувствително намалява междуетажните премествания, както и максималното хоризонтално преместване на нивото на покрива, като по този начин съществуващата рамка се предпазва от развитие на пластични деформации.

На фигура 5 са показани очакваните междуетажни премествания на оригиналната (MRF) и усилената конструкция (MRF+BRB), съпоставени с допустимите стойности съгласно критерия за ограничаване на повредите. Ограниченията на междуетажните премествания, съгласно CEN EN 1998-1 (2004) са обозначени с пунктирни линии ($0,005h = 2,0$ cm; $0,0075h = 3,0$ cm и $0,010h = 4,0$ cm), където $h = 4,0$ m е етажната височина.



Фигура 4. Междуетажни премествания на оригиналната и усилената рамка.

6. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧИТЕЛНИ БЕЛЕЖКИ

В доклада са описани основните особености на BRB-диагоналите и е предложен подход за тяхното прилагане при сеизмично усиляване на съществуващи стоманени конструкции. Диагоналите, осигурени срещу изкълчване, дисипират по-голямата част от входящата сеизмична енергия чрез хистерезисно поведение (пластични деформации на опън и натиск). Те осигуряват допълнителна коравина и дуктилност на съществуващата конструкция, намаляват междуетажните премествания и защитават основната рамка от значителни повреди. Резултатите, получени от анализа на изследваната конструкция, показват приложимостта на представената концепция. Влагането на BRB-диагонали в съществуващата рамка с корави възли чувствително намалява междуетажните

премествания, както и максималното хоризонтално преместване на нивото на покрива, като по този начин се осигурява работа на основната рамка в еластичен стадий.

Необходими са по-нататъшни изследвания, използващи нелинеен анализ и по-детайлни параметрични изследвания за потвърждаване на представените числени резултати и по-точно предсказване на поведението на ниско-дуктилни стоманени рамки, усиленни с BRB-диагонали.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bosco M., Marino E., Rossi P., Design of steel frames equipped with BRBs in the framework of Eurocode 8, *Journal of Constructional Steel Research*, 113 (2015) 43–57
- [2] Takeuchi T., Wada A., Review of Buckling-Restrained Brace Design and Application to Tall Buildings, *International Journal of High-Rise Buildings*, September 2018, Vol. 7, No 3, 187-195
- [3] Bonchev G., Belev B., Mualla I., Linked Columns with Rotational Friction Dampers As a Technique For Passive Seismic Protection Of Existing Steel Structures, 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, 2018
- [4] CEN. EN 1993-1-1: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for building, European Committee for standardization, Bruxelles, 2005
- [5] CEN. EN 1993-1-8: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, European Committee for standardization, Bruxelles, 2005
- [6] CEN. EN 1998-1-1: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for building, European Committee for standardization, Bruxelles, 2005
- [7] C&S, Inc. (2015), SAP2000 V18, Berkeley, CA., 2015.
- [8] КТСУ. Норми за проектиране на стоманени конструкции. София, 1987.
- [9] Quang Xie, Dual System Design Of Steel Frames Incorporating Buckling-Restrained Braces, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China
- [10] László Gergely, Vigh, Ádám Zsarnóczay, Tamás Balogh, Eurocode conforming design of BRBF – Part I: Proposal for codification