

**КРИТЕРИИ ЗА ОЦЕНКА НА ДИАФРАГМЕНОТО ПОВЕДЕНИЕ НА  
СТОМАНОБЕТОННИ ПЛОЧИ СЪС И БЕЗ ОТВОРИ**

**инж. Йонко Димитров – докторант**

ВСУ „Черноризец Храбър“ – Варна

***Резюме:** Изследва се поведението на стоманобетонни подови конструкции с и без отвори при хоризонтални сеизмични въздействия като корави и гъвкави диафрагми. На основа на анализ на резултатите са дефинирани критерии за предварителна оценка гъвкавостта на диафрагмите.*

***Ключови думи:** стоманобетонна плоча, отвор, сеизмично въздействие, корава диафрагма, гъвкава диафрагма*

**CRITERIA FOR ASSESSMENT OF DIAPHRAGM BEHAVIOR OF  
REINFORCED CONCRETE SLABS WITH AND WITHOUT OPENINGS**

**Eng. Yonko Dimitrov – PhD student**

VFU “Chernorizets Hrabar” – Varna

***Abstract:** The behavior of reinforced concrete floor structures as rigid and flexible diaphragms with openings under horizontal seismic actions is studied. Based on the analysis of the results, criteria for assessing the flexibility of the diaphragms are defined.*

***Keywords:** reinforced concrete slab, opening, seismic action, rigid diaphragm, flexible diaphragm*

## 1. Увод

Съвременните конструкции се налага да отговарят на различни функционални, геометрични и архитектурни изисквания. Тези изисквания понякога водят до проектиране на сложни като очертания подови диафрагми, включващи плочи с отвори или нерегулярна геометрия.

Във всяка сграда съществуват множество елементи, чиято роля е да преразпределят или поемат хоризонтални натоварвания. Съвкупността от тези елементи обуславя трансфера на усилията от съответното вертикално ниво до основата на сградата. Има две основни ориентации на основните елементи:

- вертикални: стоманобетонни стени (шайби), укрепени рамки и рамки, поемащи огъващи моменти;
- хоризонтални: подови или покривни конструкции и фундаменти;

Покривните и подовите конструкции обикновено се наричат диафрагми. Подова диафрагма може да се счита за корава, полукорава или гъвкава.

Основната функция на подовите конструкции е да поемат гравитационни натоварвания и да ги предадат на вертикалните елементи на конструкцията като колоните и стените. Освен това те играят главна роля в преразпределението на ветровите и сеизмични усилия между отделните вертикални елементи, поемащи хоризонтални въздействия (като рамки и шайби). При стоманобетонните конструкции обикновено това са стоманобетонните етажни плочи. Поведението на подовите конструкции от вертикални товари е много добре изучено и съществуват множество методи за тяхното оразмеряване. При проектирането на конструкциите за сеизмични въздействия, сградите се проектират и детайлират да работят като единен елемент. Това спомага да се повиши капацитета и да се поддържа целостта

на сградата. Хоризонталните сили, получени от сеизмичните премествания, се пренасят до основата на сградата посредством вертикалните системи, проектирани за поемане на напречни усилия. Тези вертикални елементи се обединяват като едно цяло традиционно посредством етажните конструкции. В този смисъл подовите плочи, които основно поемат гравитационни натоварвания, се проектират също така като хоризонтални диафрагми за поемане и предаване на хоризонталните сили върху съответните вертикални носещи елементи [1][2].

## **2. Изисквания за диафрагмено действие на подовите конструкции**

При анализа на многоетажните сгради, натоварени на странични въздействия основното приемане е, че в подовите конструкции не се развиват деформации в тяхната равнина (т.нар. „диафрагмено действие“). За повечето сгради наличието на подови диафрагми допринася до най-икономично и рационално поемане на напречните сеизмични сили. Затова е важно те да бъдат проектирани с достатъчна коравина в план, както и ефективно свързване с вертикалните носещи конструкции.

При модел с корави диафрагми те трябва да изравняват преместванията по протежение на цялата си дължина за да прехвърлят действащите хоризонтални сеизмични сили върху съответните вертикални елементи съобразно тяхната относителна коравина [3][4]. Ако подовата конструкция няма достатъчно коравина в план, по периферията ѝ се появяват значителни напрежения от огъване в равнината на плочата и това води до повишаване на усилията, предавани върху някои от вертикалните носещи конструкции, за които те не са оразмерени. Освен това при някои видове конструкции приемането, че модела е с корави диафрагми, води до

сложно преразпределение на усилията върху вертикалните елементи. Например това се случва в смесените носещи системи, съставени от рамки и шайби. При наличието на значителна разлика в коравината на плочата между два съседни вертикални елемента, подовата конструкция получава значителни нормални напрежения в план, което води до големи деформации в план. Във всички случаи, при недостатъчна коравина на плочата в план, допускането, че моделът е с корави диафрагми, дава значителна разлика с реалното преразпределение на усилията между вертикалните елементи.

Поради изложените причини, изследването за гъвкавост на диафрагмите е важно за правилна оценка на тяхното влияние върху цялостното поведение на сградите при сеизмични въздействия.

Някои нормативни документи (EC8-1 [3], EBCS8 [12], ЕАК-2000 [13]) дефинират определени качествени критерии по отношение на формата на диафрагмата, докато други (UBC-97 [9], ASCE7-05 [10], FEMA-274 [11], IS1893:2016 [14]) дефинират количествени критерии, определящи диафрагмата като корава или гъвкава. Степента на гъвкавост представлява отношението между преместванията на гъвката диафрагма към преместванията на корава диафрагма. При това приемане могат да се извършват изследвания за степента на гъвкавост при различни отношения на размерите на плочите и етажността на сградата [5][6][7].

### **3. Критерии за диафрагмено поведение на стоманобетонни плочи**

Всички норми за противоземетръсно строителство приемат в повечето случаи подовите диафрагми да се моделират като напълно корави без да се отчита деформативността в план на стоманобетонните конструкции. Независимо, че приемането на корави диафрагми е сравнително точно при сеизмичния анализ на повечето сгради, при някои

случаи на сградни конфигурации може да настъпи значително деформиране на подовите диафрагми. За такива сгради някои норми (EC8, EBCS8, ЕАК-2000) дават определени количествени критерии по отношение на формата на диафрагмата, докато други (UBC-97, ASCE7-05, FEMA-274, IS1893:2016) дават количествени критерии по отношение на деформациите в план на диафрагмите.

### **3.1. Eurocode 8 (EC8, 2004)**

В Европейския стандарт EN1998-1:2004 (EC8-1) за проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия в точка 4.2.1.5 се казва, че при сградите подовите плочи (включително покрива) играят важна роля в цялостното поведение на конструкцията. Те действат като хоризонтални диафрагми, които поемат и предават инерционните сили към вертикалните конструктивни елементи и осигуряват тези системи да действат заедно за поемане на хоризонталното сеизмично натоварване. Действието на плочите като диафрагми е особено подходящо в случаи на сложни и неравномерно разпределени вертикални конструктивни системи или където се използват съвместно системите с различни хоризонтални деформационни характеристики (например при съставени системи от два вида подсистеми или смесени системи). Системите на подовите плочи и покривът трябва да бъдат осигурени с коравина и носимоспособност в план и с ефективна връзка към вертикалните конструктивни системи. Специално внимание трябва да се обърне на некомпактни или много удължени в план очертания и в случай на големи отвори в подовите плочи, особено ако последните са разположени в близост до главни вертикални конструктивни елементи и по този начин затрудняват ефективната връзка между вертикалните и хоризонталните конструкции. Диафрагмите трябва да имат достатъчна

коравина в план за разпределението на хоризонталните инерционни сили към вертикалните конструктивни системи според приетите предпоставки при анализа, особено когато има значителни промени в коравината или отместване на вертикалните елементи над и под диафрагмите.

Коравината на подовите конструкции в равнината им трябва да е достатъчно голяма в сравнение с коравината на вертикалните конструктивни елементи, така че деформацията на подовата конструкция да има малко влияние върху разпределението на силите между вертикалните конструктивни елементи. В това отношение L, C, H, I и X форми в план би трябвало да бъдат внимателно изследвани, особено що се отнася до коравината на страничните части, която трябва да бъде сравнима с тези на централната част, за да се удовлетвори условието за корава диафрагма.

Диафрагмата се приема за корава, ако хоризонталните ѝ премествания при изчислителната сеизмична ситуация, когато се моделира с действителната деформативност в равнината си, никъде не превишават с повече от 10% съответните абсолютни хоризонтални премествания на корава диафрагма.

В точка 5.10 на EC8-1 се приема, че една масивна стоманобетонна плоча изпълнява функциите на диафрагма, ако дебелината ѝ е не по-малка от 70 mm и е армирана в двете хоризонтални направления най-малко с минимална армировка. Сеизмичното проектиране трябва да включва проверка за крайно гранично състояние на стоманобетонни диафрагми в конструкции с клас на дуктилност DCH със следните характеристики:

- неправилни геометрични форми или разделени в план форми, диафрагми с ъгли изрязвания и връзвания;
- нерегулярни и големи отвори във диафрагмата;

- нерегулярно разпределение на маси или коравини (както например при отстъпи или отместване);
- сутерени със стени, разположени само в част от периметъра или само в част от площта на партерния етаж.

Ефектите от въздействие в стоманобетонните диафрагми могат да се изчислят чрез моделиране на диафрагмата като висока греда (гредостена), равнинна ферма или модел с натиснати и опънати диагонали върху еластични опори.

В случаи на ядрови или стенни конструктивни системи с клас на дуктилност DCH, трябва да се направи проверка за пренасянето на хоризонталните сили от диафрагмите към ядрата или стените. За тази цел се прилагат следните изисквания:

- изчислителното напрежение на срязване в контактната повърхнина между диафрагма и ядро или стена трябва да се ограничи до  $1,5 f_{ctd}$ , за да се контролира напукването;
- трябва да се осигури подходяща носимоспособност срещу разрушаване от хлъзгане при срязване, като се приеме, че наклонът на натисковия диагонал е  $45^\circ$ . Трябва да се предвидят допълнителни пръти, допринасящи за носимоспособността на срязване в контактните повърхнини между диафрагми и ядра или стени.

По отношение на отвори в диафрагмите не се предписват изисквания.

### **3.2. Uniform Building Code (UBC97)**

Съгласно Section 1630.6 на Uniform Building Code (UBC97) [9] диафрагмите могат да се класифицират като гъвкави за целите на пренасяне на етажните напречни сили и усукващи моменти когато максималната

напречна деформация на диафрагмата е повече от два пъти средното етажно преместване на съответния етаж. Това може да се определи като се сравни изчисленото преместване в хоризонтална посока на средната точка на диафрагмата с етажното преместване на съседни до нея вертикални носещи конструкции под действието на странично натоварване. С други думи диафрагмата може да се счита за корава при  $\beta < 2$  и гъвкава при  $\beta \geq 2$ , където:

$$\beta = \frac{\Delta_{Flexible\ diaphragm}}{\Delta_{Average\ story\ drift}}$$

В Section 1629.5 се предписва, че етажните напречни сили се разпределят върху вертикалните носещи конструкции пропорционално на тяхната относителна коравина. Освен това според Section 1629.6 усукващите ефекти се вземат под внимание само когато диафрагмата не е гъвкава.

По отношение на отвори в диафрагмите не се предписват изисквания.

### **3.3. American Society of Civil Engineers (ASCE 7-16)**

Съгласно Section 12.3.1.2 на ASCE 7-16 [10] една диафрагма може да се счита за корава, ако се състои от стоманобетонна плоча с отношение на размерите, по-малко от 3, и липсват хоризонтални нерегулярности. В Section 12.3.1.3 се дава количествен критерий за класифициране на диафрагмата като гъвкава, а именно:

$$\frac{\delta_{MDD}}{\Delta_{ADVE}} > 2$$

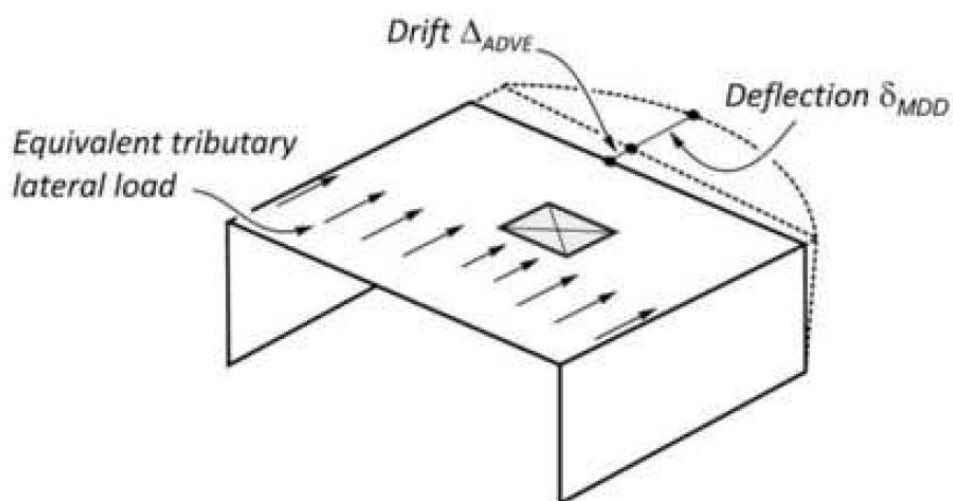
където  $\delta_{MDD}$  и  $\Delta_{ADVE}$  са дадени на фиг. 1.

Съгласно Section 12.10.1 диафрагмите се проектират едновременно за усилия от срязване и огъване. При нарушения в диафрагмата, като отвори или връзвания, проектирането трябва да осигури достатъчен капацитет на



диафрагмата за поемане на трансферните усилия, заедно с другите усилия. Ефектите от усукване се вземат под внимание само при корави диафрагми.

Влиянието на отвори в диафрагмите се отчита относно хоризонталната нерегулярност на конструкцията, като се счита, че такава съществува, ако отворът е поне 50% от площта на контура, който обхваща цялата диафрагма.



**Фиг. 1.** Гъвкава диафрагма (ASCE 7-16)

#### **3.4. Federal Emergency Management Agency (FEMA274)**

Съгласно Section C3.2.4 на FEMA274 [11] подовите диафрагми са основен елемент при сеизмичното проектиране. Те пренасят получените при земетресение усилия на етажните нива и покрива към вертикалните системи и ги разпределят между тях в зависимост от тяхната относителна коравина.

Подовите диафрагми се класифицират като гъвкави, твърди и корави. Диафрагмите се разглеждат като гъвкави, когато максималните странични деформации на диафрагмата са поне 2 пъти по-големи от средното етажно

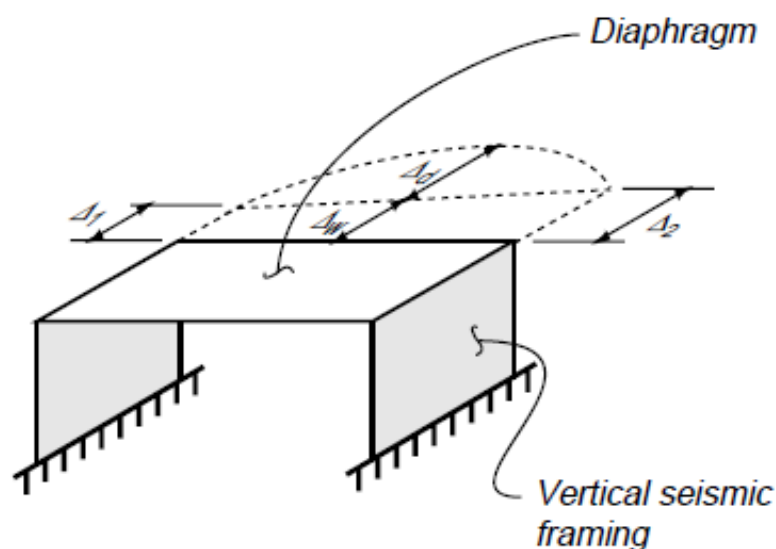
преместване на етаж непосредствено под диафрагмата. За диафрагми, подпирани на сутеренни стени, средното преместване на етаж над диафрагмата може да се използва вместо това на сутерена.

Една диафрагма се приема за корава, когато максималните странични деформации на диафрагмата са не повече от половината от средното междуетажно преместване на съответния етаж. В останалите случаи диафрагмата се приема за твърда.

Междуетажните премествания и деформациите в диафрагмите се определят от етажните сеизмични сили. Деформациите в план на подовата диафрагма се определят от разпределеното странично натоварване, получено от инерционните сили на масите на съответното ниво.

При сгради, където всички подови плочи представляват гъвкави диафрагми, вертикалните системи могат да се изчисляват самостоятелно, като сеизмичните маси се определят на базата на приспадаща се площ.

Влиянието на отвори в диафрагмите не се разглеждат.



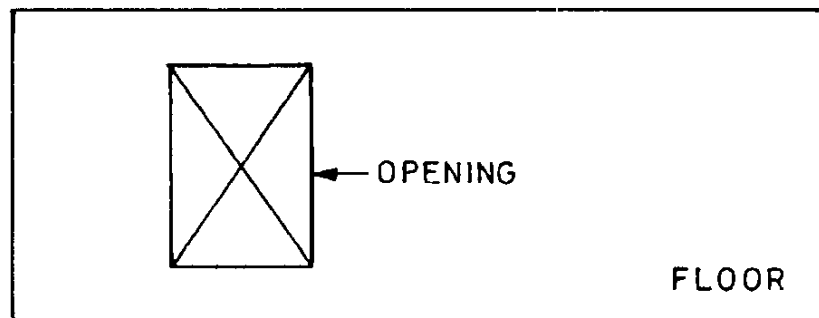
Фиг. 2. Концепция за хоризонтална диафрагма (FEMA274)

### **3.5. Indian Standard (IS1893 (Part 1): 2016)**

Според Section 4.8 на IS1893:2016 [14] диафрагмата се дефинира като хоризонтална или почти хоризонтална система, която пренася напречни сили към вертикалните съпротивителни елементи, например подови плочи или хоризонтални прътови системи.

Подова диафрагма се счита за гъвкава, ако се деформира така, че максималното странично преместване, мерено от хордата на деформираната форма, на всяка точка от диафрагмата е повече от 1,5 пъти средното преместване на цялата диафрагма.

При корави диафрагми общата етажна напречна сила се разпределя към вертикалните носещи системи с приемането на безкрайна коравина в план. Когато подовите конструкции не могат да се считат за безкрайно корави в равнината си, етажната напречна сила се разпределя върху вертикалните системи, като се взема под внимание гъвкавостта на диафрагмата.



***Фиг. 1.6. Прекъсване в диафрагма (IS 1893)***

Диафрагми с резки промени в коравината като отвори или изрязвания, по-големи от 50% от площта на затворения около диафрагмата контур, се счита за хоризонтална нерегулярност.

### **3.6. Greek code for seismic resistant structures (EAK2000)**

В раздел 3.2.1 на ЕАК2000 [13] за сгради, подложени на хоризонтални сеизмични въздействия, и когато са изпълнени условията на диафрагмено действие на плочите, за подовите конструкции е достатъчно да се приемат три степени на свобода (две трансляционни и една ротационна). В този случай е достатъчно масите да се концентрират в центъра на масите на всеки етаж. Съгласно т. 3.2.5 условията за диафрагмено действия могат да се считат за изпълнени, ако отношението на размерите в план е по-малко от 4 и ако отворите в плочата са по-малки от 30% от площта в основата на сградата.

За сгради, където диафрагменото действие не може да бъде осигурено, е необходимо да се добавят достатъчно степени на свобода, така че с коректна дискретизация да се представи деформацията на плочата в план. В този случай ефектите от деформацията на плочите в план върху разпределението на хоризонталните сили трябва да се вземат под внимание. Големи изрязвания, които създават отслабени сечения в диафрагмите, следва да се избягват. Носимоспособността на тези диафрагмите в тези зони трябва да проверява и достатъчна армировка трябва да се постави, дори ако се използват опростени, но консервативни приемания и методи. По същата причина разлика в нивата на плочите на един и същи етаж следва да се избягва.

### **3.7. Ethiopian Building Code (EBCS-8, 1995)**

В раздел 2.4.2.5 на ЕВКС-8 [12] хоризонталните диафрагми трябва да осигуряват чрез достатъчна коравина пренасянето на сеизмичните сили към вертикалните носещи системи. Когато подовите диафрагми имат достатъчна коравина в тяхната равнина, масите на всеки етаж могат да се концентрират

в центъра на масите, като по този начин намаляват степените на свобода на подовите конструкции до три (две хоризонтални премествания и една ротация около вертикална ос).

В раздел 3.12 диафрагмите следва да притежават достатъчна коравина в план, особено в случаи, когато има голяма разлика в коравината на вертикалните носещи системи над и под диафрагмата.

Условията за коравина на диафрагма се считат за изпълнени, ако разликите в преместванията на всички точки от диафрагмата спрямо преместванията на кораво тяло са не повече по 5%.

При проектирането за сеизмични въздействия за класове на дуктилност DC "Н" и DC "М" трябва да извършват проверки на стоманобетонните диафрагми в следните случаи:

- нерегулярни геометрии или разделени форми в план, изрязвания и връзвания;
- нерегулярни и големи отвори в плочите;
- нерегулярно разпределение на масите и/или коравините (например при излизания или прибирания по височина);
- сутерени със стени, разположени само в част от периметъра на сутерена.

В тези случаи ефектите в стоманобетонните диафрагми може да се определят чрез моделирането има като дълбоки греди върху пластични опори или като прътови ферми в план.

При наличието на ядра или стенни конструкции трябва да се проверява дали възниква пренасяне на хоризонталните сили от диафрагмата към тях. В този смисъл се прилагат следните изисквания:

- срязващите напрежения при връзката между диафрагмата и ядрото или стената не трябва да превишава  $1,5f_{ctd}$  за контролиране на напукването;
- следва да се осигури достатъчна коравина срещу разрушение от хлъзгане при срязване без отчитане на съдействието на бетона ( $V_{cd} = 0$ ). Допълнителна армировка следва да се постави за увеличаване на коравината на срязване при връзката между диафрагмите и ядрата или стените.

#### 4. Изводи

От направения преглед на нормите за проектиране могат да се направят следните изводи:

- всички норми по принцип приемат, че в повечето случаи подовите диафрагми могат да се моделират като идеално корави без деформативност в равнината си. Освен това, за да се дефинират условията, при които деформацията в план е необходимо да се вземе под внимание, някои норми (EC8, ЕАК2000) въвеждат определени качествени критерии по отношение на формата на диафрагмата, докато други (UBC, ASCE, FEMA) задават количествени критерии по отношение на връзка между деформацията в план и средното междуетажно преместване;
- количествените критерии за класифицирането на подовите диафрагми като гъвкави, твърди или корави (UBC, ASCE, FEMA) са доста неясни и двусмислени, тъй като определянето на деформациите на диафрагмата в план зависят от силите, приложени върху тях, а разпределението на силите зависи от деформациите;

- някои норми (IS1893) не предлагат никакъв аналитичен модел за изследване на гъвкавостта в план, някои (ЕАК2000) по принцип предлагат подовата коравина да бъде коректно моделирана (без други пояснения), а други препоръчват аналитичните модели да се приемат като дълбоки греди (EC8, ASCE, FEMA) или като равнинни прътови конструкции (EC8). Освен това EC8 изисква такова моделиране само при проектиране по клас на дуктилност DCH, приемайки за всички останали случаи на сгради използването на модел с корави диафрагми при извършване на динамичен анализ;
- предложените модели на дълбоки греди (EC8, ASCE, FEMA) или равнинни прътови конструкции (EC8) за диафрагмите съдържат в себе си много приближения и ограничения при моделирането по отношение на формата, свързаността и коравината на подовите диафрагми (които работят като непрекъснати равнинни конструкции), като заедно с това нормите не предвиждат по-надеждни и по-широкообхватни аналитични модели. От тази гледна точка, аналитичните модели с използване на равнинни крайни елементи (мембрани или черупки) съдържат много малко опростяващи предпоставки.

## **ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Игнатиев Н., Сотиров П., Михалева Д., Павлов Ив.,  
Практическо ръководство с решени примери по прилагането на  
Еврокод 8-1 – Проектиране на конструкциите за сеизмични  
въздействия (нови сгради), 2012

- [2] Васева Е., Игнатиев Н., Сотиров П., Михалева Д., Павлов Ив. Практическо ръководство с решени примери по прилагането на Еврокод 8-3 – Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия, Трета част (Оценка и усилване на сгради), КИИП, София, 2012
- [3] Михалева, Д., Павлов, Ив., Игнатиев, Н., Критерий за хоризонтална регулярност в случай на усукване, Международна научна конференция „Проектиране и строителство на сгради и съоръжения и приложение на Еврокодовете”, Варна, 2010, стр. 192÷200
- [4] Павлов, Ив., Михалева, Д., Игнатиев, Н., Критерии за регулярност в план при връзване или при отвор, Пета Международна научно-приложна конференция „Архитектура, строителство – съвременност”, Варна, ISSN: 1314-3816, 2011, стр. 378-384
- [5] Михалева, Д. Сеизмичен анализ на едноотворни рамки с пълнежна зидария, ВСУ „Черноризец Храбър“, 2021, ISBN 978-954-715-719-4
- [6] Павлов, Ив., Михалева, Д., Оценка на сеизмичната сигурност на стоманобетонна рамкова конструкция, Международна научна конференция „Проектиране и строителство на сгради и съоръжения”, София, ISSN: 1314-6955, 2012, стр. 554-559
- [7] Димитров, З., Павлов, И. „Пукнатинообразуващи моменти в правоъгълни стоманобетонни сечения, подложени на огъване“ Международна научна конференция „Архитектура, строителство – съвременност”, Сборник с доклади II, Варна, 2015, стр. 347-353, ISSN: 1314-3816



- [8] EN1998-1:2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. CEN, [EC8-1, 2004]
- [9] Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, Structural Engineering Provisions, Whittier, California, [UBC-97, 1997]
- [10] ASCE7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, American Society Of Civil Engineers, 2016
- [11] Federal Emergency Management Agency (1998), National Earthquake Hazard Reduction Program Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-274, Washington, D.C.
- [12] Ethiopian Building Code- 8, 1995 [EBCS 8, 1995]
- [13] Greek Code for Seismic Resistant Structures [EAK2000]
- [14] Indian Standard [IS 1893 (Part 1): 2016]. “Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures (Part I)”