

**ИЗСЛЕДВАНЕ ДИАФРАГМЕНОТО ПОВЕДЕНИЕ НА КВАДРАТНИ
СТОМАНОБЕТОННИ ПЛОЧИ С КВАДРАТЕН ОТВОР**

инж. Йонко Димитров – докторант
ВСУ „Черноризец Храбър“ – Варна

***Резюме:** Изследва се поведението на стоманобетонни подови конструкции с отвори при хоризонтални сеизмични въздействия като корави и гъвкави диафрагми. Извършва се моделиране и анализ на резултатите с цел дефиниране на критерии за оценка гъвкавостта на диафрагмите.*

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

**STUDY OF DIAPHRAGM BEHAVIOR OF SQUARE REINFORCED
CONCRETE SLABS WITH SQUARE OPENING**

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. Modeling and analysis of the results is performed in order to define criteria for assessing the flexibility of the diaphragms.*

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

1. Увод

В световен мащаб съществуват значителен брой изследвания на поведението на сградите при наличие на корави диафрагми. Тяхното проектиране се е превърнало в традиционно и повечето норми за проектиране предполагат такова поведение. Все повече, обаче, започва да се обръща внимание на гъвкавото поведение на подовите плочи, особено при наличието на значителни нерегулярности в подовите конструкции и по височина на сградата, като са въведени количествени и качествени показатели за тяхната оценка. За съжаление, много малко норми за проектиране третираат влиянието на отвори върху гъвкавостта на диафрагмите.

Подовите диафрагми имат основна роля в поведението на сградите при сеизмични въздействия. Те повишават коравината на конструкцията и предават усилията чрез диафрагменото действие между елементите, поемащи напречните сеизмични сили (шайби, рамки и др.).

Инерционните диафрагмени усилия са в резултат на ускоренията на масите на подовите плочи на различни нива на конструкцията. Тези усилия се предават към вертикалните носещи конструкции посредством коравината на плочата, работеща като диск.

2. Диафрагмено действие на подовите конструкции

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].

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. 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

носеци 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 [8], EBCS8 [9], ЕАК-2000 [10]) дефинират определени качествени критерии по отношение на формата на диафрагмата, докато други (UBC-97 [11], ASCE7-05 [12], FEMA-274 [13], 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.

Най-сложният параметър, от който зависи поведението на конструкциите, е тяхната геометрия. Тя включва както размерите и формата в план на подовата конструкция, така и размерите, формата и разположението на вертикалните носещи конструкции. Повечето стандарти за проектиране възприемат редица количествени критерии за оценка

поведението на строителните конструкции при сеизмични въздействия, базирани на геометрията на елементите, но само когато подовите плочи се приемат за „корава диафрагма“. Отворите в плочите се отчитат единствено при определяне на центровете на масите. Те, обаче, може да бъдат съществен фактор върху поведението на подовите конструкции, тъй като намаляват коравината им в тяхната собствена равнина [3][4]. По този начин размерите, формата и разположението на отворите в плочите оказват влияние върху деформативността в план на плочите и върху преразпределението на сеизмичните усилия върху вертикалните носещи конструкции.

Критериите за доказване на поведението на подовата конструкция като „корава диафрагма“, дадени в нормативните документи, могат да се сведат до следните два критерия:

- Съгласно EC8-1 една диафрагма 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;
- Съгласно UBC97, ASCE7-16 и FEMA274 една диафрагма се приема за корава, когато максималната напречна деформация на диафрагмата е повече от два пъти средното етажно преместване на съответния етаж.

При първия критерий е необходимо да се правят два отделни модела на конструкцията с и без приемането на подовата конструкция за „корава диафрагма“ и след това да се сравняват резултатите за всички точки от конструкцията [5][6]. Това е изключително трудоемко и много сложно за практическо приложение.

Вторият критерий е значително по-опростен спрямо първия, тъй като се отчитат деформациите само при вертикалните носещи системи и средните между тях точки от подовата конструкция. Освен това ротационните форми на трептене в този случай не влияят върху средните междуетажни премествания на съответните точки. Тогава поведението на плочите може да се анализира самостоятелно в две взаимноперпендикулярни направления и да се отчита разположението на вертикалните носещи системи само в разглежданото направление.

За да се изследва само влиянието на отворите върху диафрагменото поведение на подовите конструкции, следва да се изолира максимално влиянието на други параметри на геометрията, като брой, разположение и размери на вертикалните носещи системи. Поради тази причина в настоящото изследване се приемат следните хипотези:

- Разглеждат се само транслационните форми на трептене на конструкцията. Изследването се прави само в една хоризонтална посока без отчитане на наличието на вертикални носещи системи в другото перпендикулярно хоризонтално направление, резултатите за което могат да се определят аналогично;
- Вертикалните носещи конструкции в разглежданите модели се приемат с еднакви коравини. Това елиминира ротацията на плочата, която по принцип не оказва влияние върху крайния резултат;
- Изследват се само еластичните премествания на плочата в нейната равнина. По този начин преместванията се получават пропорционални на сеизмичните сили и резултатите не зависят от интензивността на сеизмичните въздействия;

- Като критерий за „корава диафрагма“ се приема този, даден в UBC97, ASCE7-16 и FEMA274 и се определя по формулата

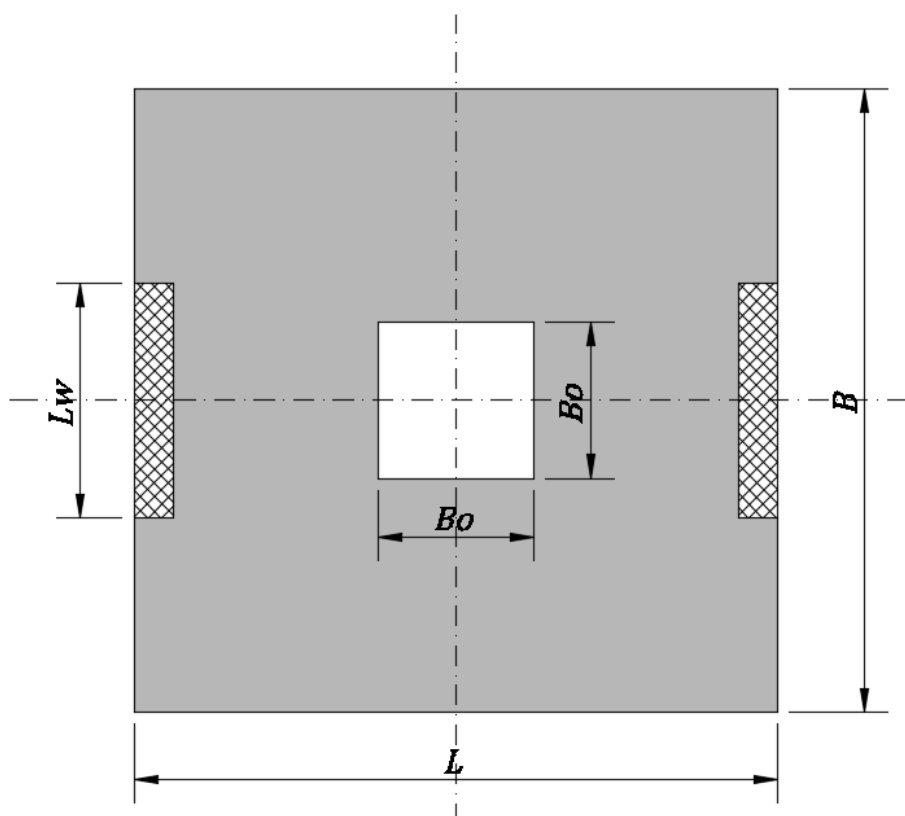
$$\beta = \frac{\Delta_{Flexible\ diaphragm}}{\Delta_{Average\ story\ drift}} < 2$$

3. Избор на модели за изследване

В стандартите за проектиране се изисква предварително доказване на хипотезата за „корава диафрагма“. Предвид необходимостта от определяне на ефекта от наличие на отвори в подовите конструкции, най-подходящо за използване е комбиниране между гредови модели и модели с крайни елементи, т.е. подовите конструкции да се моделират като равнинни елементи с крайни елементи (хоризонтални гредостени). Във всяко направление плочата може се разглежда като подпряна на две или повече вертикални носещи системи, поемащи сеизмичните усилия. По този начин могат да се получат опростени пространствени модели.

Предвид безкрайния брой възможни форми както на подовата конструкция, така и на формата и разположението на отворите в нея, настоящото изследване се ограничава до плочи с квадратна или правоъгълна форма и с квадратен отвор в средата на плочата. Поради това, че анализът на диафрагменото поведение изисква определянето на максималните деформации в план на плочата, най-подходящ се явява случая на подова конструкция, подпряна в двата края на две вертикални носещи системи (тип „проста греда“), тъй като при еднакви други условия при по-голям брой опори деформациите са по-малки. Тогава геометрията на плочата за изследване се приема, както е показана на фиг. 1, където дължината на плочата е отбелязана с L , широчината с B , а размерът на отвора – с B_o .

Вертикалните носещи системи се моделират като стенни елементи, с еквивалентна на реалните носещи системи коравина. Предвид това, че критерият за „корава диафрагма“ изисква определяне на междуетажни премествания, стенните конструкции са приети с етажна височина $3,0\text{ m}$, ширина $0,25\text{ m}$ и еквивалентна дължина L_w .



Фиг. 1. Геометрия на подовата конструкция в план

Параметрите на геометрията в изследването се ограничават до следните стойности:

- отношение между размера на отвора и широчината на плочата

$$0 \leq \frac{B_0}{B} \leq 0,80$$

- отношение между еквивалентната дължина на стенната конструкция и широчината на плочата

$$0,25 \leq \frac{L_w}{B} \leq 0,50$$

Предвид изпълнение на изискването на EC8-1 за максимално разстояние от $20m$ между вертикалните носещи системи, в настоящото изследване за широчина на плочата е прието $B = 5m$ и дължина $L = 5m$.

Дебелината на плочата оказва пряко влияние върху коравината на диафрагмата в нейната равнина и съответно върху нейните деформации. За варианти на дебелината на плочата h_f се приемат $10cm$, $15cm$ и $20cm$. По-големи дебелини увеличават значително коравината на подовата конструкция и в повечето случаи хипотезата за „корава диафрагма“ е валидна дори и при големи отвори в плочата.

Класът на бетона не оказва съществено влияние върху коравината на подовата конструкция, тъй като модулът на еластичност на бетона не се изменя значително при масово използваните бетони в строителството. Поради тази причина в настоящото изследване е използван минимален клас C20/25 с модул на еластичност $E = 3 \cdot 10^7 MPa$.

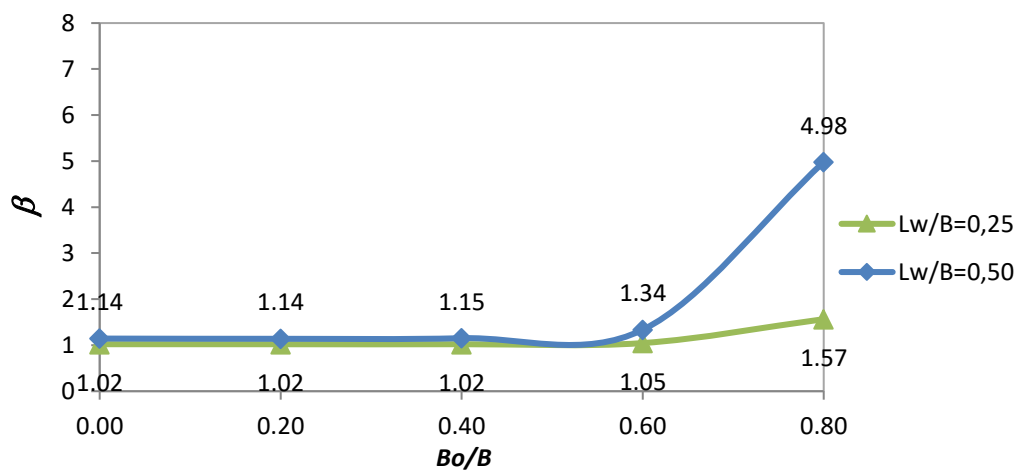
За целите на настоящото изследване хоризонталното сеизмично натоварване върху подовата конструкция се приема $10kN/m^2$.

4. Резултати от моделирането

За моделиране на конструкцията е използван софтуерен продукт Radimpex Tower v8.2. Подовата конструкция е моделирана като стоманобетонна плоча, подпряна на стоманобетонни стени с дебелина $25cm$. Резултатите от проверката на критерия за „корава диафрагма“ са представени в показаните по-долу таблици и графики.

Табл. 1. Резултати при $L = 5m$; $B = 5m$; $h_f = 10cm$

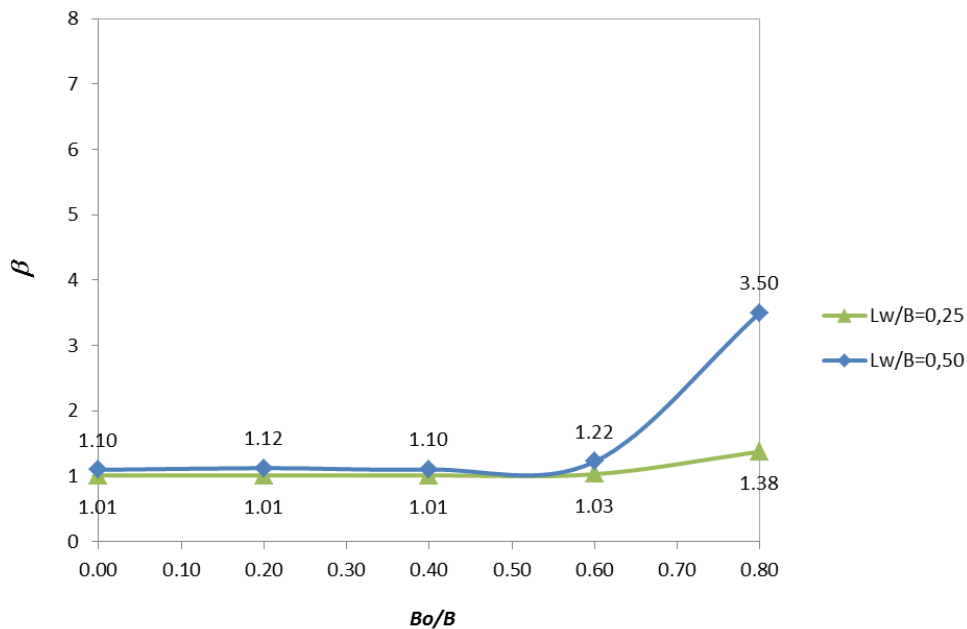
Еквивалентна дължина $L_w/B = 0,25$				
B_0/B	$\Delta_{\text{Flexible diaphragm}}$	$\Delta_{\text{Average story drift}}$	β	Корава диафрагма
0.00	1.0296	1.0080	1.021	Да
0.20	0.9894	0.9693	1.021	Да
0.40	0.8660	0.8480	1.021	Да
0.60	0.6749	0.6451	1.046	Да
0.80	0.5636	0.3600	1.566	Да
Еквивалентна дължина $L_w/B = 0,50$				
0.00	0.2100	0.1835	1.1444	Да
0.20	0.2048	0.1798	1.1390	Да
0.40	0.1809	0.1570	1.1522	Да
0.60	0.1542	0.1155	1.3351	Да
0.80	0.2540	0.0510	4.9804	Не



Фиг. 2. Стойности на параметъра β при $L = 5m$; $B = 5m$; $h_f = 10cm$

Табл. 2. Резултати при $L = 5m; B = 5m; h_f = 15cm$

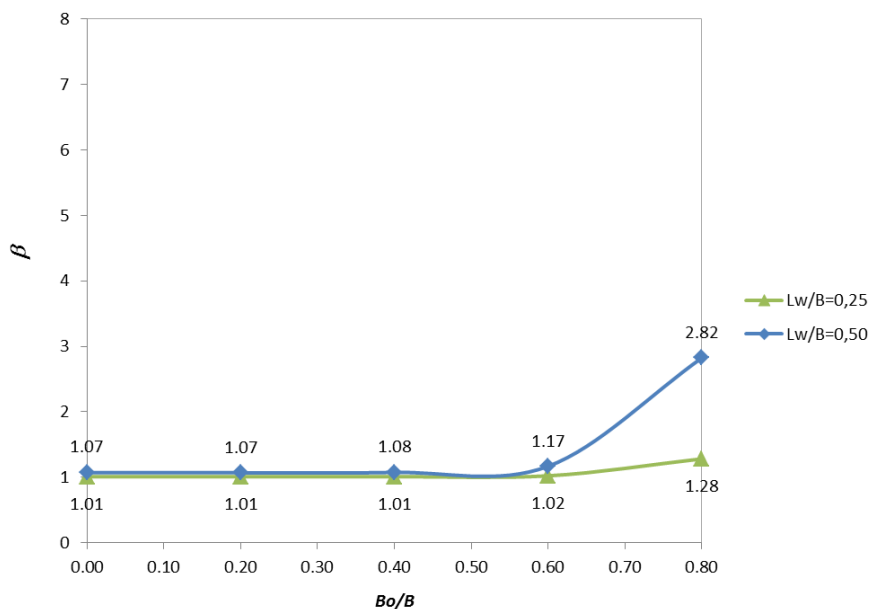
Еквивалентна дължина $L_w/B = 0,25$				
B_0/B	$\Delta_{\text{Flexible diaphragm}}$	$\Delta_{\text{Average story drift}}$	β	Корава диафрагма
0.00	1.0128	0.9985	1.0143	Да
0.20	0.9729	0.9596	1.0139	Да
0.40	0.8515	0.8396	1.0142	Да
0.60	0.6588	0.6391	1.0308	Да
0.80	0.4966	0.3607	1.3768	Да
Еквивалентна дължина $L_w/B = 0,50$				
0.000	0.1963	0.1789	1.0973	Да
0.200	0.1971	0.1753	1.1244	Да
0.400	0.1688	0.1532	1.1018	Да
0.600	0.1386	0.1133	1.2233	Да
0.800	0.1902	0.0543	3.5028	Не



Фиг. 3. Стойности на параметъра β при $L = 5m; B = 5m; h_f = 15cm$

Табл. 3. Резултати при $L = 5m; B = 5m; h_f = 20cm$

Еквивалентна дължина $L_w/B = 0,25$				
B_0/B	$\Delta_{\text{Flexible diaphragm}}$	$\Delta_{\text{Average story drift}}$	β	Корава диафрагма
0.00	1.0038	0.9931	1.0108	Да
0.20	0.9642	0.9542	1.0105	Да
0.40	0.8437	0.8348	1.0107	Да
0.60	0.6504	0.6357	1.0231	Да
0.80	0.4628	0.3609	1.2823	Да
Еквивалентна дължина $L_w/B = 0,50$				
0.00	0.1891	0.1762	1.0732	Да
0.20	0.1848	0.1727	1.0701	Да
0.40	0.1624	0.1510	1.0755	Да
0.60	0.1307	0.1119	1.1680	Да
0.80	0.1579	0.0559	2.8247	Не



Фиг. 4. Стойности на параметъра β при $L = 5m; B = 5m; h_f = 20cm$

Анализът на данните показва логична закономерност при по-големи дебелини подовата конструкция да има по-малки относителни премествания, респективно по-ниска стойност на показателя β . Огъвателната коравина на плочата в нейната равнина се увеличава пропорционално на нарастването на дебелината на плочата. При относителна еквивалентна дължина $L_w/B = 0,25$ във всички случаи се получава, че подовата конструкция е с достатъчно дебелина, която да осигурява поведение на корава диафрагма. Минималното отношение на дебелината на плочата към подпорното разстояние между вертикалните носещи системи се получава $h_f/L = 1/200$. Това отношение показва, че дори с много малка дебелина на плочата може да се постигне поведение на корава диафрагма.

Единствено изключение от казаното по-горе е, когато отворът е с относителен размер $V_o/B = 0,80$. В този случай при дебелина $h_f < 15$ cm подовата конструкция работи като гъвкава диафрагма.

5. Заключение

Проведеното изследване относно влиянието на отвори върху диафрагменото поведение на стоманобетонни плочи при сеизмични въздействия потвърждава необходимостта от провеждане на подробни анализи в тази област на базата на аналитични модели на конструкциите. Особен принос в това отношение дава възможността за използване на съвременен софтуер, с помощта на който да могат да се анализират множество вариантни решения.

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