



Получена: 21.08.2023 г.

Приета: 27.10.2023 г.

ЗА НЕОБХОДИМОСТТА ОТ ФОРМИРАНЕ НА ЛОКАЛЕН НАБОР ЗАПИСИ НА АКСЕЛЕРОГРАМИ ЗА ИНЖЕНЕРНИ АНАЛИЗИ НА СТРОИТЕЛНИ КОНСТРУКЦИИ

М. Кутева-Генчева¹, Цв. Георгиев², Тр. Цветкова³

Ключови думи: силни земетресения, акселерограми, набор от акселерограми

РЕЗЮМЕ

Настоящата статия има за цел да представи част от работата по научноизследователски проект БН-259/22, финансиран от Центъра за научно изследване и проектиране (ЦНИП) при Университета по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ). В нея се дискутират необходимостта и ползите от използване на реално записани акселерограми за инженерни анализи на строителни конструкции. Моделирането на сеизмичното въздействие чрез записани акселерограми е полезен инструмент за: (а) възпроизвеждане на историята на сеизмичното реагиране на строежите при сеизмично въздействие и (б) оценка на коравината и носимоспособността на строителната конструкция в следствие на повреди от различни земетресения, възникнали по време на нейната експлоатация, т.е. оценка на кумулативен ефект от поредица от земетресения. В статията са обосновани критерии за регионални и местни сценарии за търсене на акселерограми, представен е кратък сравнителен анализ на тези сеизмични сценарии и препоръки от водещата международна практика.

¹ Михаела Кутева-Генчева, проф. д-р инж., кат. „Автоматизация на инженерния труд“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: kouteva_fce@uacg.bg

² Цветан Георгиев, доц. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: cvgeorgiev_fce@uacg.bg

³ Траяна Цветкова, ас. инж., кат. „Автоматизация на инженерния труд“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: tr.tsvetkova_fce@uacg.bg

1. Необходимост от моделиране на проектно сеизмично въздействие чрез записани акселерограми

1.1. Кратък истерически преглед на разрушителните земетресения в България

По-голямата част от застроената околна среда у нас, както и в Европа, е проектирана и изградена преди 80-те години на миналия век.

Дяловото разпределение на жилищните сгради в България [1] по показател „Година на построяване“ към 2017 г. показва, че само 5 % от сградите, въведени в експлоатация през периода 1919 г. – 2011 г., са построени между 1991 г. и 2000 г. За преобладаващата част от територията на страната ни (> 90 %) сеизмичната опасност се определя от средно силни и силни земетресения, които могат да възникнат както в границите на България, така и в съседни страни [1, 2].

Кратък исторически преглед показва, че през миналите столетия на територията на нашата страна са възникнали редица силни земетресения (магнитуд $M \geq 6,5$), където M е локален магнитуд. Тук са регистрирани едни от най-силните трусове в Европа през миналия век, табл. 1 (б.а. използвано е означението M за локален магнитуд т.е. магнитуд по Рихтер, по начина по който е възприето в цитираните източници [3 – 7]).

1.2. Хронология на развитието на нормативната база за сеизмично устойчиво проектиране и строителство в България

Началото на регламентиране на правилата за строителство в България датира от 1881 г. с „Правила за строеж на частни здания в градовете на Българското Княжество“ [8]. Началото на специализираната нормативна уредба за земетръсно устойчиво проектиране и строителство в България датира от XIX в., когато през 1927 г. заедно с „Правилник за проектиране на железобетонните строежи в Царство България“ са приети за ползване италианските „Технически и хигиенически норми за земетръсните места“ [9]. През 1947 г. следва издаването на Правилник за проектиране и строеж на сгради и съоръжения в земетръсни райони, който е първият български специализиран нормативен документ [10]. Развитието на нормативната уредба у нас и по света е непрекъснат процес [11], който отразява натрупаните знания и опит вследствие на претърпените загуби и щети от силните разрушителни земетресения. През последните 120 години строителните инженери в България са се ръководили в работата си от множество документи, отразяващи последователно развитието на строително-инженерната наука. Само в областта на проектирането на строежи за сеизмични въздействия последователно са разработени 12 различни национални документа. След приемането на страната в Европейския съюз, България се ориентира към въвеждането на системата Еврокодове в строителното проектиране [12]. Кратък хронологичен преглед на развитието на тази нормативна база е представен в табл. 2.

Таблица 1. Разрушителни земетресения в България

Събитие	Въздействие
София, 1818 г. [3] <i>M</i> ~ 7,2	Усетено в Брезник и Пловдив, съобщения за значителни щети в София, пострадали обществени сгради, осем джамии, отворени пукнатини в земята, в близост до джамия Баня баши се появява горещ минерален извор.
София, 1858 г. [3] <i>M</i> ~ 6,6	Усетено в Янина и Пловдив, съобщения за пострадали сгради в Ихтиман и Рилския манастир, значителни щети в София, силно засегнати 70 – 80 % от сградите, частично или напълно разрушени редица обществени гради, съборени 19 минарета, променен дебит на минералните извори в Долна баня, отворени пукнатини в земята около София, поява на нов горещ гейзер западно от София (постепенно отслабва до съществуващия и сега извор в Овча купел).
Крупник, 1904 г. [4] <i>M</i> = 7,4	Съобщения за над 200 жертви; до основи са сринати селата Крупник и Симитли, големи разрушения в градовете Горна Джумая (Благоевград), Банско и Разлог.
Горна Оряховица, 1913 г. [5] <i>M</i> = 7,0	Съобщения за 40 жертви; усетено в цяла България, катастрофални последствия за Велико Търново и Горна Оряховица, до основи са сринати 80 % от сградите, много от които паметници на културата; стойността на щетите към времето на документирането им се оценява на над 12 000 000 лв.
София, 1917 г. [5] <i>M</i> = 5,1	Без документиран данни за човешки жертви; разрушение на десетки сгради и сериозно повредени стотици други.
Чирпан, 1928 г. [4, 6] <i>M</i> = 7,0	Съобщения за 120 жертви и над 500 ранени; засегната е около 1/7 от територията на страната, усетено от над 400 000 души, Чирпан и Борисовград (Първомай) са изравнени със земята, една трета от Пловдив е разрушена, пострадали над 240 села в околността; разрушени 402 училища; необходимите средства за възстановяване към времето на документираните щети се оценяват на 1 милиард лева.
Вранча, 1940 г. [7] <i>M</i> = 7,7	Съобщения за 113 жертви, над 200 ранени; разрушени голям брой къщи, магазини, църкви и други обществени сгради във Враца и Мездра, сериозни щети в градовете София, Русе, Шумен, Добрич, Видин, Велико Търново.
Вранча, 1977 г. [7] <i>M</i> = 7,2	Съобщения за над 130 жертви и над 150 ранени; разрушени много промишлени и 355 жилищни сгради, 463 сгради са силно повредени, съборени са 5 училища, 50 са силно повредени, разрушени са 21 административни и търговски сгради, други 35 са повредени; унищожена уредба на 220 kV в Подстанция „Мизия“ при село Радомирци, през която по това време се осъществява единствената връзка между АЕЦ „Козлодуй“ и района на София [7].

Таблица 2. Хронология на нормативната база в България за сеизмично устойчиво проектиране и строителство

Година	Нормативен документ
1881 г.	Правила за строеж на частни здания в градовете на Българското Княжество
1927 г.	Правилник за проектиране на железобетонните строежи в Царство България
	Приети за ползване утвърдените в Италия през 1927 год. с кралски декрет „Технически и хигиенически норми за земетръсните места“
1947 г.	Правилник за проектиране и строеж на сгради и инженерни съоръжения в земетръсните райони на България (ППССИСЗРБ-47)
1957 г.	Правилник за проектиране и строеж на сгради и инженерни съоръжения в земетръсните райони на НРБ (ППССИСЗР-57)
1961 г.	Правилник за антисеизмично строителство (ПАС-61)
1964 г.	Правилник за строителство в земетръсни райони (ПСЗР-64)
1978 г.	Указания за проектиране и изпълнение на жилищни и обществени сгради и съоръжения в земетръсни райони
1987 г.*	Норми за проектиране и изпълнение на сгради и съоръжения в земетръсни райони (НПССЗР-87)
2007 г.*	Наредба №2 от 23 юли 2007 г. за проектиране и изпълнение на сгради и съоръжения в земетръсни райони
2012 г.*	Наредба №2 от 27.01.2012 г. за проектиране и изпълнение на сгради и съоръжения в земетръсни райони
2013 г. * (дата публикуване БИС)	БДС EN 1998, част 1 до част 6 – официален превод на български език на някои части на Еврокод 8 и съответни Национални приложения БДС EN 1998- .../NA за всяка част
	БДС EN1998-1:2004: Еврокод 8. Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия. Част 1: Основни правила, сеизмични въздействия и правила за сгради със съответни Национални приложения БДС EN 1998- .../NA
* споменаване на акселерограми като алтернатива за моделиране на сеизмичното въздействие	

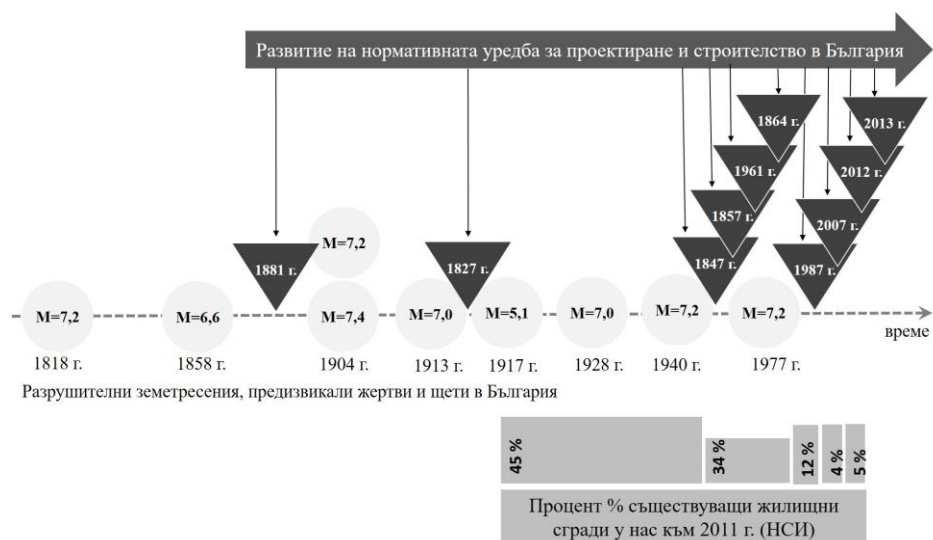
1.3. Съществуващи сгради

Редица от съществуващите днес сгради и съоръжения са устояли на различни по брой и сила земетресения през дългия си период на експлоатация. Емблематични за облика на град София обществени сгради като тези на Народното събрание, Археологическия музей, Централните хали, централната сграда на СУ „Св. Климент Охридски“, Народната

библиотека „Св. св. Кирил и Методий“, Централната минерална баня (днешния музей на гр. София), черквата „Св. София“ в съвременния ѝ вид, катедралния храм „Александър Невски“ и редица други са проектирани и изградени преди развитието и приемането на съвременните норми за проектиране и строителство в сеизмични райони.

Интересен е паралелът на времевата линия на разрушителните земетресения, предизвикали значителни човешки и материални загуби (табл. 1) и развитието на нормативната база за проектиране и строителство у нас (табл. 2), показана на фиг. 1. Очевиден е изводът, че по-голямата част от жилищния сграден фонд (79 %) е построена много преди наличието на съвременните стандарти за проектиране (б.а. тук се визират нормите от 1987 година [12] и след това [13]).

Наличната официална статистика за ръста на строителството на жилищни сгради във времето [14] е обвързана с изпълнението на директивата за енергийна ефективност 2012/27/ЕС [15] и поради това предоставената информация се отнася само за жилищни сгради. От проведени лични проучвания и преглед на частни архиви може обосновано да се предположи, че подобна статистическа картина би била валидна и по отношение на публични сгради, съоръжения и критична инфраструктура. Достъпните (макар и неструктурирани) данни за периода на проектиране и изграждане на по-голямата част от тези строежи показва, че те са проектирани и построени по относително стари нормативни документи и поради това не съответстват на съвременните стандарти за сеизмична осигуреност на строежите. Този кратък анализ подсказва необходимост от активизиране на процесите на цифровизация в строителния бранш. Създаването на целева структурирана цифрова информация чрез разработване на електронни технически паспорти и досиета на строежите и електронна система за тяхната поддръжка и актуализация във връзка с различни интервенции, включително претърпени земетресения е належаща съвременна необходимост. Сигурността и безопасната експлоатация на строежите изискват яснота по отношение на действителната им коравина и носимоспособност, както и оценка на потенциалната необходимост от предварително сеизмично усилване (ретрофит) с цел привеждането им в съответствие със съвременните критерии и изисквания за земетръсноустойчива застроена среда.



Фиг. 1. Разрушителните земетресения в България (табл. 1) и хронология на нормативна уредба за сеизмично устойчиво проектиране и строителство, табл. 2

Един от инструментите на съвременното сеизмично инженерство за реалистична оценка на реагирането на съществуващи строителни конструкции по време на земетресение е използването на специализирани анализи с числено моделиране на сеизмичното въздействие чрез записи на акселерограми от реални земетресения.

1.4. Нови строежи

В съвременното проектиране и строителство на сгради и съоръжения все по-често се срещат задачи за моделиране на строителни конструкции с изявиени нерегулярности в план или по височина, строежи от критичната инфраструктура, чието запазване на функциите в случай на земетресение е от жизнено важно значение за обществото (чийто отказ би причинил неприемлива вреда или прекъсване), специални строителни конструкции със сеизмична изолация и др. Решаването на тези задачи изисква използването на динамичен анализ и моделиране на сеизмичното въздействие чрез акселерограми (б.а. това е набор от записани дискретни стойности на ускорението на земната основа във времето в рамките на продължителността на конкретно сеизмично събитие).

Моделирането на сеизмичното въздействие с акселерограми се въвежда като възможност с нормите за проектиране и изпълнение на сгради и съоръжения в земетръсни райони от 1987 г., НПССЗР-87 [12]. Текущите актуални изисквания и правила за проектиране и изграждане на сгради и съоръжения в сеизмични райони са формулирани в системата Еврокодове – Еврокод 8 [13]. Той е фокусиран основно върху моделирането на сеизмичното въздействие посредством спектър на реагиране, като така се отчитат: а) ускорението на земната основа при земетресение с условен период на повторяемост 475 години; б) видът на конструктивната система и нейното реагиране (чрез коефициента на поведение q); в) значимостта на строежа (посредством коефициента на значимост γ); г) местните инженерно-геоложки условия на строителната площадка (посредством параметъра S) и д) потенциалните огнища на силни земетресения (чрез избора на вид на спектъра). Формулирани са и препоръчителни насоки относно възможността за моделиране на сеизмичното въздействие с акселерограми, като са дефинирани ясни критерии, на които трябва отговарят сеизмичните сигнали (записани или генерирани), избрани за съответния динамичен анализ.

2. Критерии за композиране на набори акселерограми за инженерни анализи

Изборът на акселерограми за инженерни анализи се основава на:

(а) дефиницията на подходящи сеизмични сценарии за моделиране на проектно сеизмично въздействие и спецификата на средата на разпространение на сеизмичните вълни – геоложката пътека и земната основа на площадката на строежа;

(б) изискванията на нормативната база по отношение на броя необходими сеизмични сигнали и съответствието им с целевите спектрални криви, изисквания за продължителност на сигнала и др. [13].

Сеизмичният сценарий за дадено земетресение се описва с три основни групи параметри: а) местоположение на сеизмичния източник спрямо регистриращата станция, б) магнитуд на сеизмичното събитие, в) параметри, описващи геометрията и кинематиката на сеизмичния източник.

Обикновено за дадена сеизмична зона се разглеждат сценарийни земетресения с различни нива на тежест: умерени, силни и екстремни земетресения. Широко приет в международната практика в сеизмичните инженерни анализи, включително *EC8* [13], е сценарий за земетресение с период на повторяемост от 475 години. Друг критерий за разграничаване на сценарии на сеизмични събития е разстоянието на зоната на площадката спрямо хипоцентъра: близки и далечни събития.

Критериите за избор на сеизмични сценарии за площадки в България се основава на параметрите, описващи сеизмичната опасност на територията на България, която се контролира от две групи земетресения: а) местни плиткни корови земетресения с фокална дълбочина в диапазона 5 – 35 km и б) среднодълбоките силни земетресения в сеизмогенна зона Вранча (на територията на съвременна Румъния) [20]. Общото класифициране на близки и далечни събития, както и включването на импулсен тип записи е от съществено значение предвид ситуирането на населени места практически над сеизмични източници (София, Г. Оряховица). Сеизмичните сценарии за силните плиткни корови земетресения се описват с магнитуден диапазон $M = 6,5 - 7,5$. Пиковите стойности тук се ограничават до индикации относно максималното ускорение $PGA = 0,09 \text{ g} - 0,37 \text{ g}$ ($T_R = 475 \text{ г.}$ [13]) и $PGA = 0,1 \text{ g} - 0,5 \text{ g}$ ($T_R = 1000 \text{ г.}$, [13]). Сценариите на среднодълбоки земетресения за сеизмогенна зона Вранча са в магнитуден диапазон $M = 7,2 - 7,8$ и фокална дълбочина $H = 130 - 150 \text{ km}$ [21].

3. Източници на записи

3.1. Водеща практика в САЩ

В международен план, подробна методика за избор на сеизмични сигнали за целите на анализ и оценка на реагирането на строителни конструкции, подложени на сеизмично въздействие, е разработена от федералната агенция за управление на аварийни ситуации на САЩ и е представена във *FEMA P695* [16]. В този документ се описва методика за количествена оценка на коефициентите, включени в моделирането и оценката на реагирането на строителните конструкции при сеизмично въздействие. Основните компоненти на методиката са илюстрирани на фиг. 2. Тя обхваща:

- дефинирани характеристики на сеизмичното въздействие чрез подбран набор от записи на движението на земната повърхност;
- приложими методи за анализ;
- изисквания към пълнотата на информацията в проектите;
- изискванията към данните, които са необходими за разработване на представителни аналитични модели.

Земното движение като част от тази методика се дискутира в няколко различни аспекта. Във връзка с възможността за разрушение на строителните конструкции в случай на допуснато максимално разглеждано земетресение (Maximum Considered Earthquake (*MCE*)) се разглеждат различните нива на сеизмична опасност [17] и съответните параметри на земното движение, които са картографираны в съответните нормативни документи.



Фиг. 2. Основни компоненти на методиката за количествена оценка на коефициентите, характеризиращи сеизмичното реагиране на строителни конструкции съгласно FEMA P695 [16]

Възможността за моделиране на сеизмичното въздействие със записи на земни движения във *FEMA P695* е коментирана във връзка с описанието на процедурите за нелинеен анализ за оценка на разрушението на строителните конструкции, подложени на сеизмично въздействие. Дефинирани са набори от входни земни движения, уточнено е провеждането на нелинейни статични анализи и нелинейни динамични анализи върху индексирани архетипови модели, разработени в същия документ. Препоръчаните записи са групирани в два набора записи на земни движения: (а) от „близки“ земетресения (епицентрални разстояния до 10 km) и (б) от „далечни“ сеизмични събития (епицентрални разстояния над 10 km). Наборът от записи от близки земетресения включва две подмножества, включително движения на земята със силни импулси (подгрупа „*NF-Pulse*“), и движения на земята без такива импулси (подгрупа записи „*NF-No Pulse*“). Комплектите записи включват вълнови форми от всички силни земетресения с голям магнитуд в базата данни *PEER NGA* [18]. За всяко земетресение са посочени не повече от два от най-силните записи с достатъчна продължителност на движението, която позволява статистическа оценка на променливостта между записите и начина на реагиране на анализирания конструктивна система. Тук селектираните силни земни движения не са разграничени въз основа на условията на площадката или фокалния механизъм на сеизмичния източник. Тази методология изисква използването на набор от записи, приложими за нелинеен динамичен анализ на строителни конструкции и оценка на вероятността от разрушения за допуснато максимално разглеждано земетресение (*MCE*). Записите са целеве избрани така, че съвместяват изискванията на нормите за тримерно моделиране на строителни конструкции с представянето на много силни земетресения, „статистически“ достатъчно много на брой за оценката на възможността от разрушение и с „независимостта“ на строително-конструктивната система от спецификата на сеизмичната опасност. На практика, нито един набор от записи не може напълно да отговори на всички желани цели. Събитията с голям магнитуд са редки и в базите данни за силни земни движения (БДСЗД) има малко записи на земетресения, достатъчно силни, за да причинят разрушение на големи части от модерни сгради, проектирани и построени съгласно изискванията за земетръсно устойчиво строителство. В САЩ записите на силни земни движения датират от земетресението в Лонг Бийч през 1933 г. За периода 1933 г. – 1971 г., до земетресението в Сан Фернандо през 1971 г., са налични само по няколко записа от всяко събитие [19]. В случай че изборът на акселерограма не е съобразен със

спецификата на сеизмичната опасност (б.а. един или група от възможни сеизмични източници), инженерно-геоложката особеност на площадката може да се достигне до подвеждащи резултати. Това важи с особена сила при моделиране на история на натрупване на повреди от вече възникнали земетресения.

Критериите на *FEMA P695* за подбор на записи на силни земетресения включват:

а) магнитуд $M \geq 6,5$;

б) тип на източника – (наборите от записи включват земни движения от земетресения от източници, типични за плитки земетресения в земната кора в Калифорния, други места в западната част на САЩ и някои земетресения извън територията на САЩ);

в) инженерно-геоложки условия на конкретната площадка;

г) разстояние от сеизмичния източник до площадката;

д) брой записи за сеизмично събитие (не повече от два записа);

е) пикови параметри – максимално ускорение на земната основа $PGA > 0,2$ g, максимална скорост на земната основа $PGV > 15$ cm/s;

ж) характеристика на инструмент за регистрация – валидно честотно съдържание до най-малко 4 секунди (наборите от записи се считат за валидни за оценка на разрушаване на високи сгради с основен период на свободните трептения до около 4 s);

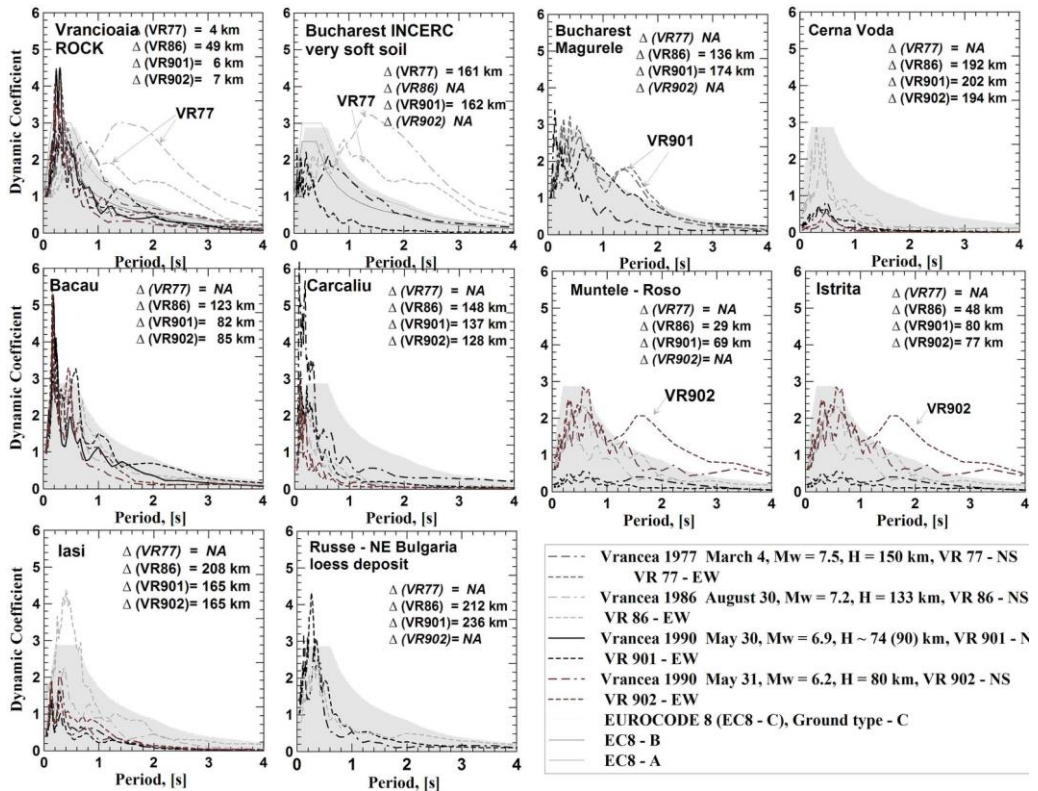
з) местоположение на регистриращия уред – свободна земна повърхност или приземен етаж в малка сграда.

Комплекът записи, дефиниран във *FEMA 695* [16], включва двадесет и два записа от далечни земетресения (*far-field*) и двадесет и осем записа от близки събития (*near-field*). Двадесет и двата записа от далечни събития (*far-field*) са избрани от налични акселерограми от 14 земетресения в периода 1971 – 1999 г., осем от които са земетресения в Съединените щати (Калифорния) и шест са възникнали на територията на пет различни чужди държави. Магнитудите варират в интервал $M = 6,5 - 7,9$. Пиковите стойности на ускорението на земната основа варират в интервал $PGA = 0,21$ g – 0,82g, пиковите стойности на скоростта на земната основа варират както следва: $PGV = 19$ cm/s – 115 cm/s. Наборът от записи от близки събития включва двадесет и осем записа (56 отделни компонента), избрани от базата данни *PEER* [18]. Четиринадесет записа са идентифицирани като „подобни на импулс“ [19]. Двадесет и осемте записа са избрани от 14 събития, от периода 1976 – 2002 г., седем от които са земетресения в САЩ (шест в Калифорния) и седем са от пет различни чужди държави. Магнитудите на събитието варират в интервал $M = 6,5 - 7,9$. Минималното разстояние между площадката и сеизмичния източник е 1,7 km, максималното разстояние е 8,8 km. Пиковите параметри на записите в този комплект са: $PGA = 0,22$ g – 1,43 и $PGV = 30$ cm/s – 167 cm/s.

3.2. Необходимост от избор на записи в съответствие със спецификата на сеизмичните сценарии

Сеизмичните сигнали, записани на конкретна площадка, носят в себе си информация за влиянието на три основни фактора върху силата на сеизмичното въздействие на разглежданата строителна площадка: (а) спецификата на сеизмичния източник по отношение на освобождаване на енергията в земната кора; (б) геоложката

пътека; (в) специфичните инженерно-геоложки условия на площадката на регистриране на сигнала. Тези три групи фактори влияят едновременно върху процесите на разпространение и взаимодействие на сеизмичните вълни от сеизмичния източник до конкретната площадка, чрез които се формират земното движение, което се предава като въздействие върху строителните конструкции фиг. 3 [22, 23]. Илюстрацията на фиг. 3 се основава на изчислени динамични коефициенти за 10 регистриращи станции на базата на записани акселерограми на тези станции от три средно дълбоки вранчански земетресения, усетени в България – 1977 г., 1986 г. и 1990 г.



Фиг. 3. Графики на динамичните коефициенти, изчислени на записи от силни средно дълбоки земетресения със сеизмичен източник Вранча [22, 24, 25] и съответните спектрални криви съгласно Еврокод 8 (EC8), земна основа клас C [13]

На фигурата е видима ясна разлика в изчислените динамични коефициенти (Sa/PGA , при коефициент на поведение $q = 1,0$) за една и съща регистрираща станция за трите сеизмични събития. Динамичните коефициенти за среднодълбоките вранчански земетресения надвишават видимо стойностите, препоръчани от EC8. При различните станции това надвишение се отнася до различни честотни интервали. Много показателни са записите на земетресението Вранча, 1977 г. на станции Вранча (епицентрално разстояние $\Delta = 4$ km) и Букурещ (епицентрално разстояние $\Delta = 161$ km), които показват един и същ тип надвишение на препоръчителните стойности. Кривата на динамичния коефициент има подобен вид и за площадка Ниш (епицентрално разстояние $\Delta = 484$ km) [25]. На фиг. 3 е илюстрирано едновременно влиянието на два фактора върху силата на

сеизмичното въздействие на площадката. Това са: (а) влиянието на характеристиките на геоложката пътека и на локалните инженерно-геоложки условия на площадката, на която са записани съответните акселерограми и (б) влиянието на параметрите на механизма на възникване на земетресението. На всяка графика във фигурата са представени спектрални криви за една и съща регистрираща станция (общо 10 станции), получени от записани акселерограми от различни земетресения, възникнали в една и съща сеизмогенна зона (Вранча). Еднаквите величини в този случай са: локалните инженерно-геоложки условия на площадката на регистриращата станция, сеизмичният източник – сеизмогенна зона Вранча, геоложките и геофизичните характеристики на пътя на разпространение на сеизмичните вълни от източника до площадката (еднаква геоложка пътека). Разликата е в характеристиките на механизма на възникване на земетресението – различни са параметрите на фокалния механизъм, фокалната дълбочина и количеството на освободената енергия в сеизмичния източник, описана с магнитуда на сеизмичното събитие.

3.3. Бази данни за силни земни движения

Базите данни за силни земни движения (БДСЗД) са ценен източник на данни и информация за целите на различните инженерни изследвания в областта на сеизмичното инженерство и инженерната сеизмология. В тях се съхранява информация за различни сеизмични събития, съответни регистриращи станции и регистрирани сеизмични сигнали. Търсенето на акселерограми в БДСЗД се извършва съгласно интерфейса, предлаган от съответната база данни, който включва параметри, описващи сеизмичния сценарий като събитие и търсено ниво на въздействие, вкл. информация за площадката на регистриращата станция. В табл. 3 са представени накратко едни от най-широко използваните публични БДСЗД.

В България регистрацията на силни земни движения се осъществява чрез национална система за регистрация, обработка и съхранение на силни земни движения, наречена Национална акселерометрична мрежа (НАМ). Тя се поддържа и ръководи от НИГГГ – БАН. С помощта на аналогови инструменти, в периода 1981 – 1987 г. са записани около 60 трикомпонентни акселерограми, включително от земетресенията в Стражица, 1986 г. ($M_w = 5,7$), Провадия, 1983 г. ($M_w = 4,2$), Вранча, 1986 г. ($M_w = 6,3$) и Вранча 1990 г. ($M_w = 6,9; 6,2$), където M_w е магнитуд по сеизмичен момент. Систематизирана подробна информация за цифровите записи относно броя на записите по години и статистическите разпределения на записите по магнитуд, максимално ускорение, максимална скорост и максимално преместване е публикувана през 1990 г. [13]. Повечето записи са генерирани от земетресения с магнитуд $M_w < 5,0$ и се характеризират с пикови стойности както следва: $PGA < 0,15 \text{ m/s}^2$, $PGV < 0,05 \text{ m/s}$ и $PGD < 0,005 \text{ m}$. В началото на 21 век НАМ е модернизирана с цифрови регистриращи инструменти и днес тя включва 25 бр. цифрови 18-битови акселерометъра Etna (Kinometrics), инсталирани предимно в станциите на НИГГГ-БАН. Към момента регистрациите на силни земни движения са недостатъчни като брой и представителност за композиране на цялостен набор от акселерограми за инженерни анализи съгласно изискванията за 3 – 7 различни сеизмични сигнала за дадена площадка [11]. Това налага дефинирането на критерии за търсене и избор на сигнали в европейските и международните БДСЗД и съответното им мащабиране съобразно спецификата на сеизмичните сценарии, симулиращи сеизмичната опасност на територията на нашата страна.

Таблица 3. Широко използвани публични БДСЗД

БДСЗД	Описание на достъпните данни
<p><i>PEER</i> Ground Motion Database Pacific Earthquake Engineering Research Center [18]</p>	<p>Богата колекция от записи на силни движения от цял свят, поддържана от <i>Тихоокеанския изследователски център за земетресения (PEER)</i>; немащабиран и неротиран записи (достъпни както са записани), $M_L \geq 2,4$ 29 000 записи от 139 станции, достъпни и необработени, и коригирани записи</p> <p style="text-align: right;">https://ngawest2.berkeley.edu/</p>
<p><i>ESM IESD</i> Internet Site for European Strong-Motion Data [25]</p>	<p><i>Европейската база данни за силни земни движения (ESM)</i> предоставя достъп до данни, записани в Европа, Средиземноморието и Близкия изток, включва данни от няколко държави, включително Италия, Гърция, Турция и Швейцария; ~3000 записи на над 900 земетресения, $M_L \geq 4,0$ записани от 691 станции, достъпни са и необработени, и коригирани записи</p> <p style="text-align: right;">http://www.iesd.hi.is/</p> <p>През последните двадесет години базата е допълнена със записи на 800 компонента от 14 силни европейски земетресения ($M_L = 6,5 - 7,3$).</p>
<p><i>ISMD - INGV</i> Strong Motion Database [26]</p>	<p>Достъпни вълнови форми, италиански земетресения $M_L \geq 3,0$; данните се записват от <i>Националната сеизмична мрежа (RSN), управлявана от Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)</i> и регионални мрежи, управлявани от няколко доставчици</p> <p style="text-align: right;">http://ismd.mi.ingv.it/notes-ismd.php</p>
<p><i>COSMOS</i> Consortium of Organizations for Strong Motion Observation Systems [27]</p>	<p>Колекция от записи на земни движения от земетресения в Калифорния и други региони на САЩ и по света: управлява се от <i>Калифорнийската геоложка служба</i>, различни поддържани формати за данни, включително ASCII и miniSEED, ~5 000 записи, $M_L \geq 2,0$, 1500 записващи станции</p> <p style="text-align: right;">https://strongmotion.org/ https://www.strongmotioncenter.org/vdc/scripts/default.plx</p>
<p><i>ORFEUS</i> European Infrastructure for seismic waveform data in EPOS [28]</p>	<p>Колекция от записи от земетресения $M_L \geq 4,0$, записани в Европа, <i>Европейско - средиземноморски и близкотоизточен региони</i> от 1969 г. насам; съдържа необработени времеви серии на ускорение, ръчно обработени вълнови форми на ускорение, скорост и преместване, спектри на реагиране на ускорение и преместване и други инженерни параметри.</p> <p style="text-align: right;">http://www.orfeus-eu.org/data/strong/</p>
<p>В таблица 3 е използвано означението M_L за локален магнитуд по Рихтер.</p>	

4. Заключение

Моделирането на сеизмичното въздействие с акселерограми е полезен и необходим подход за реалистична оценка на поведението на строителните конструкции по време на земетресение. Формирането на целеви комплект от акселерограми за динамични анализи в регионален план е дългосрочна комплексна задача. Решението ѝ включва разширяване на системите за регистрация, насърчаване на обмена на данни между мрежите и обема на публично достъпните данни за силни земни движения, разработване на регионална класификация на изградените типове строително-конструктивни системи по подобие на модела от [30].

Публичните бази данни за силни земни движения се разрастват бързо и предоставят възможности за търсене на записи по предварително дефинирани сценарии по отношение на сеизмичния източник и инженерни характеристики на движението на земната основа. В последните 20 години европейската интернет база данни за силни земни движения е обогатена с 800 компонента от 14 силни европейски земетресения. Достъпните публикации и проведени лични разговори показват, че националната БДСЗД не разполага с достатъчен брой представителни записи за композиране на комплекти акселерограми за динамични сеизмични анализи, съответстващи на тези сценарии. В национален план е крайно наложително разработването на ясен регламент за достъп до записите на НАМ и записите от инструментирането на различни обекти от критичната инфраструктура.

Към момента съществува само една подробна и широко използвана в международен мащаб методика с ясни препоръки за избори на набори от акселерограми за инженерни анализи [16]. Тази методика се основава на американска нормативна уредба за проектиране на земетръсно устойчиви сгради и съоръжения [29]. Оценката на сеизмичната осигуреност на строежите съгласно актуалната нормативна уредба за проектиране на нови сгради и съоръжения у нас [13] се основава на две групи спектрални криви. Те ясно отразяват спецификата на регионалната сеизмична опасност, съобразени и със силните междиннофокусни вранчански земетресения, които са рядък природен феномен в световен мащаб. Националният комплект акселерограми за динамични анализи на строителни конструкции, проектирани / изградени на територията на България, трябва да включва както близки и далечни събития, импулсни сигнали, така и задължително акселерограми от среднодълбоки далечни земетресения. Формирането на такъв комплект е достатъчно трудна задача, дори и на регионално европейско ниво, и практически невъзможна в национален план към момента.

Бързото развитие на БДСЗД и необходимостта от реалистично моделиране на историята на сеизмични въздействия (б.а. поредица от земетресения), особено за съществуващи сгради и съоръжения поставя задачата за мащабен анализ на новопостъпващите данни в публичните БДСЗД. Наред с това, при поставена основа от класифициране на съществуващия градски сграден фонд с отчетените особености на регионалните строително-конструктивни системи и периоди на строителство [30] по отношение на уязвимостта на тези строеж и при земетръс, предполага внимателен подбор на набора акселерограми. Този подбор трябва да е съобразен както с типа конструктивна система, така и с регионалните и локалните особености на сеизмичната опасност.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор 259/2022 е подкрепена финансово от Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. NIGGG, BAN. 2018, Methodology for seismic risk analysis, assessment and mapping of the Republic of Bulgaria (in Bulgarian).
2. Solakov, D., Raycheva, Pl., Simeonova, St., Aleksandrova, I. Strong destructive earthquakes realized on the territory of Bulgaria after 1900. // Bulgarian Geophysical Journal, 2021, 44: 33-42 (in Bulgarian).
3. Avdev, St. The devastating historical earthquakes in Sofia. Besike, 2007, ISBN 978-954-91635-4-4 (in Bulgarian).

4. *Vatsov, S.* Earthquakes in Bulgaria in 1904. State printing house, Sofia, 1905, 283 (in Bulgarian).
5. *Vatsov, S.* Earthquakes in Bulgaria in 1913-1916. State printing house, Sofia, 1923, 195 (in Bulgarian).
6. *Dipose, 1931.* Report of the work done from April 25, 1928, to November 1, 1931, by the Directorate for the Relief and Reconstruction of the 1928 Earthquake District, Sofia, 421 (in Bulgarian).
7. *Brankov, G.* The Vrancha Earthquake – 1977 – Consequences in N. R. Bulgaria. BAN, 1983, 428 (in Bulgarian).
8. Rules for the construction of private buildings in the cities of the Bulgarian Principality, 1881 (in Bulgarian).
9. Regulations for the design and construction of buildings and structures in earthquake zones, 1947 (in Bulgarian).
10. *Ignatiev, N., Sotirov, P.* Design of building structures for seismic actions according to BDS EN 1998-1. 2010 series of lectures (in Bulgarian).
11. *Georgiev Tzv., Rangelov N.* Introduction of Eurocodes in Bulgaria and implementation of Eurocode 3. // Scientific journal of civil engineering, 2015, 4 (2): 21-31.
12. Standards for the design and construction of buildings and structures in earthquake-prone areas (NPSSZR-87), 1987 (in Bulgarian).
13. BDS EN 1998-1:2004. 2004, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance.
14. Ministry of Energy, Republic of Bulgaria. 2017, National long-term programme for the promotion of investments in measures aimed at improving the energy performance of the national stock of public and private residential and commercial buildings (in Bulgarian).
15. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council, 2012.
16. FEMA P695. 2009, Quantification of Building Seismic Performance Factors. Washington (DC): Federal Emergency Management Agency.
17. *Aki, K., Richards, P. G.* Quantitative Seismology. Freeman and Co, 1980, ISBN 13: 9780716710585.
18. <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-databases>, last visited on 20.04.2023.
19. *Baker, J. W.* Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. // Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5) 1486-1501.
20. GFI. 2009, Final report on the contract: Seismic zoning of the Republic of Bulgaria, in accordance with the requirements of Eurocode 8 and production of seismic zoning maps taking into account the seismic hazard over the territory of the country. Sofia: GFI-BAS, 2009.
21. *Kouteva-Guentcheva, M., Paskaleva, I., Panza, G. F.* Earthquake Source and Local Geology Effects on the Seismic Site Response. NATO ARW, Springer, 2008, ISBN 978-1402092404.
22. *Kouteva-Guentcheva, M.* Modelling, analysis and assessment of the seismic impact of the Vranchan earthquakes on the territory of Bulgaria. 2012, PhD thesis, 80 (in Bulgarian).

23. Panza, G. F., Romanelli, F., Vaccari, F. Seismic wave propagation in laterally heterogeneous anelastic media: Theory and applications to seismic zonation. // *Advances in Geophysics*, 2003, **43**: 1-95.

24. Nenov, D., Georgiev, G., Paskaleva, I., Lee, V. W., Trifunac, M.. Strong Ground motion data in EQINFOS: accelerograms recorded in Bulgaria between 1981 – 1987. // Report No CE, 1990, 90: 02.

25. Ambraseys, N., Smit, P., Sigbjornsson, R., Suhadolc, P., Margaritis, B. Internet-Site for European Strong-Motion Data. // Research-Directorate General, Environment and Climate Programme16, 2002, 45: 113-129.

26. <http://isimd.mi.ingv.it/notes-isimd.php>, last visited on 15.08.2023.

27. <https://strongmotion.org>, last visited on 15.08.2023.

28. <http://www.orfeus-eu.org/data/strong/>, last visited on 15.08.2023.

29. American Society of Civil Engineers. 2006, ASCE/SEI 7-05: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures.

30. Milutinovic, Z., Trendafiloski, G. RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. WP4: Vulnerability of current buildings, 2003.

ON THE NEED OF A LOCAL SET OF ACCELEROGRAM RECORDS FOR DYNAMIC ANALYSIS OF STRUCTURES

M. Kouteva-Guentcheva¹, Tzv. Georgiev², Tr. Tsvetkova³

Keywords: *strong earthquake, accelerograms, set of accelerograms*

ABSTRACT

This paper aims to present part of the work on scientific research project BN 259/22 funded by the Center for Research and Design at UACEG. It discusses the need and benefits of using real-time recorded accelerograms for seismic structural analysis. Applying numerical modelling of the seismic action via recorded accelerograms allows for: (a) simulation of the time history of the seismic response of the structure under seismic action and (b) assessment of stiffness and load-bearing capacity of the structure as a result of damages from various earthquakes that occurred during its operation, i.e. assessment of cumulative effect of a series of earthquakes. The paper also substantiates criteria for local seismic scenarios for selecting accelerograms. Brief comparative analysis of these seismic scenarios and the established recommendations sourced in the state-of-art international practice is performed and commented.

¹ M. Kouteva-Guentcheva, Prof. Dr. Eng., Dept. "Computer Aided Engineering", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: kouteva_fce@uacg.bg

² Tzvetan Georgiev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Steel, Timber and Plastic Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: cvgeorgiev_fce@uacg.bg

³ Trayana Tsvetkova, Eng., Dept. "Computer Aided Engineering", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: tr.tsvetkova_fce@uacg.bg