БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

К НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО ГЕОФИЗИКА, ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОГРАФИЯ Департамент "Сеизмично инженерство"

Гл.ас. инж. Михаела Петрова Кутева-Генчева, докторант на свободна подготовка

Дисертационен труд за придобиване на научна и образователна степен "доктор"

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

МОДЕЛИРАНЕ, АНАЛИЗ И ОЦЕНКА СЕИЗМИЧНОТО ВЪЗДЕЙСТВИЕ НА ВРАНЧАНСКИТЕ ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ ЗА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ

научна специалност 010204 – "Механика на деформируемото твърдо тяло"

<u>Констултанти:</u>

Доц. Д-р Иванка Паскалева, ЕПУ, Перник, България **Проф. Джулиано Ф. Панца**, Университет Триест; Международен Център по теоретична физика (ICTP), Триест, Италия

Дата на зачисляване -7.07.2009 год. / Заповед No39, София, 07.07.2009 г./ Дата на отчисляване - 4.05.2012 год. / Заповед 413 / 3.05.2012 г. /

<u>Членове на Научното жури:</u>

Проф. дгн Ст. Шанов Проф. д-р инж. З. Петков Доц. д-р Б. Рангелов Доц. д-р инж. И.Паскалева Доц. д-р инж. К. Хаджийски

София, 2012 г.

Благодарности:

Бих искала да изразя сърдечната си благодарност към членовете на моето семейство за непрекъснатата подкрепа, за търпението им към всичките ми проявени странности и за откраднатото от тях време.

Бих искала да изразя дълбоката си благодарност към моите научни консултанти доц. Ив. Паскалева и проф. Дж. Панца за ползотворното сътрудничество, за отворените врати, за преодолените препятствия и за начертаните хоризонти.

Благодаря на ръководството на Департамент Сеизмично инженерство (преди ЦЛСМСИ) и на ръководството на НИГГГ за оказаната подкрепа и помощ по отношение на планирането и изпълнението на научно-изследователската ми програма, обучението ми по време на докторантурата, както и за организицията и провеждането на административните процедури.

Благодаря на всички колеги за конструктивните коментари, забележки и професионални напътствия.

Благодаря на Членовете на журито за отделеното време и за всички бележки, коментари и съвети, изразени от тях в изгответните рецензии и становища.

СЪДЪРЖАНИЕ

1	Въведение. Обосновка на актуалността на поставения за решаване проблем "Моделиране, анализ и оценка на сеизмичното въздействие на Вранчанските земетресения за територията на България"	
	земетресения за територията на овлгария	4
2	Анализ на състоянието на изследванията върху моделирането на въздействието на Вранчанските земетресения в България	4
3	Инженерен анализ на натрупаните данни за периода 1983-2009, характеризиращи разрушителния потенциал на силните междинно фокусни земетресения със сеизмични източници във Вранча	
		7
4	Избор на метод за моделиране на сеизмичното натоварване от огнище Вранча на базата на преглед на съвременните методи за алтернативно представяне на сеизмичното натоварване	9
5	Описание на нео-детерминистичната процедурата за моделиране на разпространението на сеизмични вълни в хетерогенна геоложка среда	11
6	Дефиниране на сеизмични сценарии за сеизмичен източник Вранча. Дефиниране на параметрите на изчислителнния модел за прогнозна оценка на сеизмичното въздействие	17
7	Генериране на синтетични сигнали за площадка - гр. Русе. Верификация и анализ на резултатите.	
8	Основни изволи и заключения	19
Ū		25
9	Научни и научно-приложни приноси на дисертационния труд	
	Питоратира	27
	πισμαιγμα	28

1. Въведение. Обосновка на актуалността на поставения за решаване проблем "Моделиране, анализ и оценка на сеизмичното въздействие на Вранчанските земетресения за територията на България".

Сградният фонд, съоръженията и инфраструктурата, изградени на територията на България, често са изложени на широк спектър от сеизмични въздействия, свързани с различни сеизмични източници, които са разположени на териториите на страната ни и на съседните балкански държави [Paskaleva et al., 2001; Simeonova et al., 2006]. В рамките на настоящата територия на страната ни, за периода от 536 година до сега, са регистрирани девет силни земетресения, M_s >= 6.0 [Христосков, 2005 а, 6], плитки корови сеизмични събития, с фокална дълбочина до 60 км. През последните двеста години, в сеизмична зона Вранча, са документирани 64 силни земетресения с магнитуд M_w > 6, осем от които са причинили значителни щети на територията на България.

Силните междиннофокусни вранчански земетресения с магнитуд М_w > 7 предизвикват особен научно - изследователски и научно - практически интерес, тъй като техните преки и косвени последствия могат да доведат до извънредна ситуация от национален характер на териториите на застрашените страни. Сеизмогенна зона Вранча е уникален природен феномен със следните специфични особености:

- Сеизмичността е концентрирана в ограничен фокален обем, обхващащ дълбочини от 60 до 200 км, с характерни високи скорости на разпространение на сеизмичните вълни и постоянно освобождаване на относително висока сеизмична енергия [Raykova and Panza, 2006]; честотно-амплитудните характеристики на плитките и средно дълбоките земетресения, генерирани в тази зона се различават съществено [Gusev et al., 2002];
- повечето силни трусове се характеризират със стабилен механизъм на обратно разломяване (разкъсване) с повърхнина на разкъсване ориентирана СИ-ЮЗ [Moldoveanu et al., 2001; Gusev et al., 2002];
- най-силните трусове излъчват предимно дълго-периодни сеизмични вълни в честотен диапазон 0-1 Hz [Gusev et al., 2002], затихването на скоростите тези вълни е силно зависимо от честотния състав на сеизмичния сигнал.

Настоящето изследване има за цел моделиране, анализ и прогнозна оценка на очакваното сеизмично натоварване върху сградите, съоръженията и инфраструктурата на територията на България, отчитащи спецификата на природния феномен на сеизмогенна зона Вранча на база анализ на наличната информация и приложението на съвременни методи за моделиране на разпространението на сеизмични вълни в хетерогенна геоложка среда за предварително дефинирани сеизмични сценарии.

2. Анализ на състоянието на изследванията върху моделирането на разрушителния потенциал на Вранчанските земетресения в България.

Вниманието на изследователите, занимаващи се с проблематиката на сеизмична зона Вранча, е ориентирано към: (а) анализ на наличните макросеизмични и инструментални геофизични и сеизмологични данни и (б) теоретично моделиране на сеизмичното въздействие, генерирано от сеизмичните източници разположени в тази зона. През последните 10 години, в резултат на повишения интерес на научната общност към проблемите, свързани със сеизмична зона Вранча, са разработени редица международни изследователски проекти - NATO SFP 981882, NATO ENVIR.LG.960916, NATO SfP 980468; UNESCO.IUGS.IGCP 414; FP-7 Contract nr.52566/05.08.2010-2013 (DACEA); CEI projects no. 1202.001-07, 1202.136-07, 1202.038-09. Сред множеството публикации в различни научни списания и

сборници на световни и европейски научни форуми, през последните години се открояват две проблемно-ориентирани монографии: (1) Земетресенията във Вранча: Тектоника и намаляване на хазарта и риска [A.A V.V. 1999] и (2) Специалното издание на списание "Pure and Applied Geophysics" (PAGEOPH) на тема "Оценка на сеизмичния хазарт на Панонския регион" [A.A V.V, 2000].

Двадесети век се характеризира с най-висока сеизмична активност на сеизмична зона Вранча. От приблизително 9 000 известни земни труса с епицентри в района на Вранча с магнитуд M > 2.0 [Oncescu et al., 1999], в България има сигурна информация за стотина силни земетресения с магнитуд M_w > 5.0. За 40 от тези земетресения са публикувани изосеистни карти [Рижикова, 1983]. В таблица 1 са дадени фокални дълбочини и макросеизмични интензивности (МШК) на най-силните вранчански земетресения (Lungu et al., 1999; Alkaz, 2005]. Земетресението от 1977 година причинява значителни щети и разрушения в България. Броят на пострадалите жилища в гр. Русе и окръга в следствие на този трус надхвърля 10 000 [А.А.V.V, 1983а]. Последните силни земетресения със сеизмичен източник Вранча (М > 6), причинили разрушения и щети в България, са трусовете от 30.08.1986 год. и 30-31.05.1990 год.

2.1. Инструментални данни за трусовете от сеизмичен източник Вранча

Инструментални данни (акселерограми, велосиграми или сеизмограми) за силните земетресения с източник Вранча са събирани и систематизирани с помощта на мрежите за регистрация на силни земни движения на Румъния, България и Молдова. В България регистрацията на реални акселерограми от силни земетресения датира от 1981 год. През 1990 год. е публикуван каталог на регистрираните силни земни движения на територията на България за периода 1981 – 1987 год. [Nenov et al., 1990]. В България са налични инструментални записи на силни движения от две силни земетресения със сеизмичен източник Вранча – това са записаните на регистрационна станция Русе пет акселерограми за земетресенията на 30.08.1986 год, 30.05.1990 год. и 31.05.1990 год. [Nenov et al., 1990; Ambraseys et al., 2002] – Таблица 2. Оценката на честотния състав на наличните записани акслерерограми показва, че колебанията с честоти, по-големи от 5 Hz, имат несъществен принос в хоризонталното движение на почвата и че сигналът практически не съдържа честоти над 10 Hz [Христосков, 1983; Nenov et al., 1990; Ambraseys et al., 2002; Paskaleva, 2004]. Характерно за силните вранчански земетресения е значителното влияние на кинематиката на сеизмичния източник върху генерираното от него сеизмично натоварване, потвърдено и от подобието на спектралните криви за отделните компоненти наблюдавани за записите от силните земетресения от ХХ век ,1977, 1986 и 1990г., независимо от съществените различия в геоложките условия и епицентралните разстояния - фиг. 1 - 2.



Фигура 1. Графики на динамичните коефициенти, изчислени от записи на силни средно дълбоки земетресения със сеизмичен източник Вранча и съответните графики от Еврокод 8 (ЕС8) за класове земна основа С, D и E. Горе: 4.03.1977 год., регистриращи станции Ниш (Сърбия), Вранчоая и Букурещ (Румъния). Долу: 30.08.1986 год, и 30.05.1990 год. в регистрираща станция – гр. Русе (България).



Фигура 2. Графики на динамичните коефициенти, изчислени на записи от силни средно дълбоки земетресения със сеизмичен източник Вранча [Ambraseys et al., 2002; Nenov et al., 1990] и съответните графики съгласно Еврокод 8 (ЕС8), земна основа кл. С.

2.2. Теоретични оценки и анализи

Теоретичните изследвания върху проблематиката на Вранчанските земетресения и тяхното въздействие са ориентирани предимно към оценката на сеизмичната опасност в регионален [Panza & Vaccari, 2000] или национален мащаб [Radualian et al., 2000; Simeonova et al., 2006]. Тодоровска и Паскалева публикуват резултати от генериране на равномерен спектър за площадка Русе [Todorovska et al, 1995], но в научната литература преди 2000-та година няма публикации относно алтернативното представяне на сеизмичното натоварване от огнище Вранча и генерирането на синтетични сеизмични сигнали за Вранчанските земетресения.

Земетресение	Епицентрална интензивност <i>І₀</i>	Фокална дълбочина	Магни- туд <i>М</i> _w	Интензивност в СИ Б-я (гр. Русе)	Забележка
1802, 26 Октомври *	> IX	-	7.9	няма данни	*1802 год.
			8.1*		най-силното
1829, 20 Ноември	VIII	-	-	VII	досега
1838, 23 Януари	VIII	-	-	VII	възникнало
		-			земетресение
1940, 10 Ноември	IX	150	7.7	VII	
1977, 4 Mapm**	VIII - IX	109	7.5	VII - VIII	**1977 год.най-
1986, 30 Август	VII - VIII	133	7.2	IV – V	големи разрушения

Таблица 1. Силни земетресения (М > 7.0) от средно дълбок сеизмичен източник Вранча [Lungu et al., 2004; Alkaz, 2005 *, **].

Земетресение	Магнитуд Mw	Фокална дълбочина H, km	Брой регистри- ращи станции	Брой записани хоризонтални компоненти
1977, 4 март	7.4	90	3*	6*
1986, 30 август	7.2	133	11*	22*
1990, 30 май	6.9	74	14*	28*
		+/-6 (16)	2**	3**
1990, 31 май	6.2	90	8*	16*

Таблица 2. Инструментални данни за източник Вранча [Ambraseys et al., 2002*, Nenov et al., 1990 **].

3. Инженерен анализ на данните, характеризиращи разрушителния потенциал на силните междинно фокусни земетресения със сеизмични източници във Вранча през периода 1983 -2012 г.

3.1. Преглед и дефиниции на параметрите, характеризиращи разрушителния потенциал на земното движение като сеизмично натоварване

Достъпните записи на силни земни движения от междинно фокусни земетресения с източник Вранча [Nenov et al., 1990; Ambraseys et al., 2002] са анализирани на базата на оценката на пикови (максимални) и интегрални параметри [Cosenza & Manfredi, 2000]. **Пиковите параметри** включват максималното ускорение (*PGA*), максималната скорост (*PGV*) и максималното преместване на земната основа (*PGD*) и съответните отношения *PGV/PGA* и *PGD/PGV*. Максималното ускорение е основна, но не напълно надеждна, мярка на потенциала на дадено земетресение. Анализът на записани сеизмични събития показва, че земетресения с много големи максимални ускорения могат да не предизвикат големи разрушения. Максималната скорост е пряко свързана с енергетичното съдържание на сеизмичното въздействие и затова изглежда една по-представителна мярка на интензивността на земетресението. По тази причина много автори дефинират и отношението *PGV/PGA* като мярка на разрушителността на земетресението [Cosenza & Manfredi, 2000].

Интегралните характеристики включват квадратични ускорение (RMSA), скорост (RMSV) и преместване (*RMSD*), както и основаващи се на тях мерки на разрушителния потенциал на земното движение като интензивността на Ариас, *I*₄, [Arias, 1970] и коефициентът на Сарагони [Saragoni, 1999]. Интензивността на Ариас, І_А, касае енергетичното съдържание на сигнала, докато коефициентът на Сарагони се оказва една по-ефективна мярка на разрушителността на земетресението, касаеща очаквания дуктилитет, както е показано от Сарагони на примера на Чилийското земетресение от 1985 год. [Saragoni, 1999]. Друга интегрална характеристика е коефициентът на повредите, I_D, [Cosenza & Manfredi, 2000], който е свързан с броя на пластичните цикли, *n*, и следователно и с енергетичното съдържание на земетресението. Всички интегрални характеристики зависят от продължителността на земетресението, чиято прогнозна оценка не може да бъде категорична. Опитът от различни земетресения показва, че продължителността на земния трус влияе силно върху нивото на повреди в дадена конструкция. Невъзможността за надеждна прогнозна оценка на продължителността на земетресението, t_E, води до проблеми при определянето на основното енергетично съдържание на сеизмичното натоварване [Cosenza & Manfredi, 2000]. Други представителни характеристики, пряко свързани с количествената оценка на разрушителния потенциал на дадено земетресение, са спектрите на реагиране на ускоренията SA, скоростите, SV, и преместванията, SD, фундаменталния период, T и динамичният коефициент β , дефиниран като отношението $\beta = SA/PGA$.

3.1. Анализ на инструментални данни от вранчански земетресения

Анализирани са избрани записи от станциите, за които разполагаме с регистрирации и на четирите земетресения: 30.08.1986 год. (VR86), 30.05.1990 год. (VR901) и 31.05.1990 год. (VR902). От достъпните в европейската база данни 123 записани компоненти на вранчанските земетресения, тук са избрани записите на свободна повърхност от пет станции на територията на Румъния, една станция на територията на бивша Югославия и станция Русе в България. Обработени са общо 52 компоненти - 31 хоризонтални и 21 вертикални. Координатите на епицентрите на разглежданите земетресения за дадени в таблица 3. За всички избрани компоненти са изчислени следните параметри: максимално ускорение на земната основа за свободна повърхност - PGA, максимална скорост PGV, отношение PGA/PGV, интензивност на Ариас, I_A , коефициент на повреди, I_D , преобладаващ период T_P, максимална спектрална амплитуда от спектъра на реагиране на ускоренията (5% затихване) SA и динамичен коефициент β = SA/PGA.

Регистриращи станции			Брой обр	аботени ко	омпоненти		
No	Сигна-тура	Геогр. координати		Хор.	Bepm	всичко	Земетресение
		°E	٥N				
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Nis	23.901	43.305	6	3	9	VR77
2	INCERC	26.161	44.441	6	3	9	VR77
З	VRI	26.727 45.866		8	3	11	VR77,
							VR86, VR901, VR902
4	BAC	26.900	46.567	6	3	9	VR86, VR901, VR902
5	CER	28.032	44.314	6	3	9	VR86, VR901, VR902
6	CCR	28.136	45.178	6	3	9	VR86, VR901, VR902
7	ISR	26.545	45.138	6	3	9	VR86, VR901, VR902
8	Pyce	26.010	43.860	3	2	5	VR86, VR901

Таблица 3. Регистриращи станции и съответни обработени компоненти

Избраните записи са филтрирани в честотен интервал 0-1 Hz (T > 1 s), за да се намали в максимална степен влиянието на локалните инженерно геоложки условия на площадките на регистриращите станции върху амплитудата и честотното съдържание на сигнала - така получените дългопериодни сигнали отразяват предимно приноса на фокалния механизъм. За филтрираните сигнали е направена количествена оценка на същата група пикови, интегрални и спектрални параметри параметри, характеризиращи разрушителния потенциал на изследваните земетресения. Анализът на наличните акселерограми (времеви редове и спектрални характеристики), записани по време на вранчанските земетресения от 1977 (VR77), 1986 (VR86) и 1990 (VR901, VR902) година показват ясно изразена азимутна зависимост на параметрите, характеризиращи разрушителния потенциал на земното движение. Този индекс има стойности I_D $_{\rm VR77}$ ~ 13.5, I_D $_{\rm VR86}$ ~ 17, I_D $_{\rm VB901}$ ~ 15 и I_D $_{\rm VB902}$ ~ 17, които са съизмерими със стойностите на I_D , получени за силни земетресения, причинили сериозните загуби в Монтенегро – 1979 год., $M_w = 7.1$ ($I_D = 15.35$), $_{\rm UNII}$ - 1985 год., $M_w = 8.1$ ($I_D = 35.84$) и Кобе - 1995 год., $M_w = 6.9$ ($I_D = 6.91$) [Cosenza & Manfredi, 2000].

4. Избор на метод за моделиране на сеизмичното натоварване от огнище Вранча на базата на преглед на съвременните методи за алтернативно представяне на сеизмично натоварване.

Обикновено, сеизмичното натоварване се дефинира като еквиваленти статични сили, за определянето на които се използуват спектрални криви, зададени в нормативните документи. В Еврокод 8 – ЕК8 (БДС ЕN 1998-1:2005; EN 1998-1:2004) в част 1 - Дефиниране на сеизмичното натоварване, т. 3.2.3, са дискутирани различни случаи, при които е необходимо алтернативно представяне на сеизмичното натоварване във вид на акселерограми, което съществено се различава от традиционната спектрална форма на представяне на проектното сеизмично натоварване. Освен предписаните в нормите случаи на използване на акселерограми, това се налага и при динамични анализи на специални съоръжения (АЕЦ, язовири, газо-разпределителни станции, устройства за активен контрол) или специализирани анализи на поведението на дадена конструкция по време на земетресение, оценка на нивото на възможни разрушения и др. В съвременната инженерна практика сеизмичното натоварване може да бъде представено като акселерограма по следните два начина като записана акселерограма от земетресение в съответния район или сходен по геология и тектоника район или като теоретично генериран (синтетичен) сеизмичен сигнал за съответния район.

4.1. Записани акселерорами

При използуването на реално записани акселерограми е необходимо скалиране на реалните записи с използуването на специално разработени техники. Скалирането има за цел нормализиране на представителните хоризонтални компоненти на записаните реални сеизмични събития по амплитуда и мащаб във времето. Осигуряването на надежден резултат от приложението на тези методи изисква наличието на представителна база данни от записи на реални сеизмични събития. Липсата на достатъчно инструментални регистрации на силни земни движения е основен двигател на развитието на различни методи за генериране на сеизмични сигнали, отчитайки спецификата на сеизмичното огнище и геоложкия строеж на средата на разпространение на сеизмичните вълни.

4.2. Теоретично генерирани акселерорами

За целите на така нареченото алтернативно представяне на сеизмичното въздействие чрез генериране на синтетичен сеизмичен сигнал са разработени редица методи. Те могат да се класифицират в три основни групи: *статистически; вероятностни и детерминистични*. В зависимост от поставените цели и от основните предпоставки, различните методи отразяват и опростяват в различна степен моделирането на процеса на разпространение на сеизмичните вълни. Генерирането на синтетична акселерограма обединява моделирането на три вида процеси:

(1) процесите в сеизмичния източник;

(2) процеса на разпространение на сеизмичните вълни от източника от района на проектната площадка;

(3) процеса на реагиране на земната основа на проектната площадка.

Статистическото симулиране на силни земни движения [Papadimitriou, 1990; Boore, 2003 и др.], основаващо се на анализа на "бял шум" е широко използван и лесно приложим подход, за който са разработени редица програмни реализации. Тези методи, обаче, не предоставят информация за нискочестотната част на земното движение, отразяваща физиката на сеизмичния процес. Кинематичните методи са детерминистични емпирични методи, основаващи се на функциите на Грийн (Green), които отчитат реалната среда на разпространение на сеизмичните вълни и ефекта на площадката на база на реални записи на слаби земетресения от същия източник [Gallovic, 2006]. Надеждността на резултатите от приложение на този метод зависи от наличността на достатъчно данни за слаби земетресения за разглежданата площадка.

Класическите вероятностни и детерминистични методи за генериране на сеизмичен сигнал [Reiter, 1990] се основават на наличната информация за сеизмичния режим на даден район, описан с пространственото и времевото разпространение на сеизмичните прояви и съответни закони за затихване на сеизмичната енергия, излъчена OT различните сеизмични ИЗТОЧНИЦИ. Детерминистичният подход се основава на дискретни единични сеизмични събития, които се използуват за дефиниране на сценарии на сеизмичната опасност. Сеизмичният източник се свързва с най-силното земетресение, асоциирано с този източник и с дефинирането на съответни закони за затихване, след което се изчисляват стойностите на предварително избрани параметри, описващи земното движение за така дефинираните начални данни. Вероятностният подход за оценка на сеизмичната опасност позволява използуването на непрекъснати събития и на модели, които да отчитат честотата на възникване на всички земетресения, които могат да окажат влияние на дадена площадка, отчитайки в известна степен и неточностите във входните данни. Резултатите от прилагането на класическия вероятностен подход са серия криви, описващи вероятността за надвишаване или ненадвишаване на зададено ниво на сеизмичното въздействие за определен период от време. Дискусиите и анализа на силата на сеизмичното въздействие на последните разрушителни земетресения в Кобе – Япония (1995 г.), Джуарат - Индия (2001 г.), Бумердес - Алжир (2003 г.), Бам -Иран (2003 г.), Венчуан – Китай (2008 г.), Хаити (2010 г.), Модена - Италия (2012 г.). показват съществено подценяване на сеизмичното натоварване в различни региони по света, свързано с някои сериозни недостатъци на тези широко използвани методи. Основните проблеми засягат (а) закона за повторяемост, който може да бъде считан за линеен, само когато размерите на разглежданата област са много по-големи от линейните размери на сеизмичните огнища и (б) грешката, внесена в оценката на сеизмичното въздействие от законите за затихване, които в общия случай представляват зависимост на максималното ускорение на земната основа или макросеизмичната интензивност за дадена площадка от магнитуд, разстояние, дълбочина, инженерно-геоложки условия, грешки в измерванията и др., [Klügel et al., 2006, 2007].

През последните петнадесет години бе разработен т.нар. *неодетерминистичен подход* за оценка на сеизмичното натоварване [Panza et al., 2001], който се основава на общите принципи на физиката на разпространение на сеизмични вълни в хетерогенна среда, отчитайки едновременно влиянието на сеизмичното огнище и на геоложката среда на разпространение на вълните. Краен резултат от моделирането на сеизмичното въздействие са акселерограми, велосиграми и сеизмограми и съответните им спектрални и енергетични характеристики. Кратко сравнение на посочените три методики за оценка на сеизмичната опасност е изложено в таблица 4.

Съвременната световна практика се обръща все повече към прилагането на различни хибридни методи, които съвместяват предимствата на различни методи с цел реалистична теоретична оценка на сеизмичното натоварване [Klügel et al., 2006; Klügel, 2010]. Оценката на сеизмичната опасност на базата на предварително дефинирани сценарии на сеизмично въздействие се основава на данните от наблюдения, комбинирани с техники за моделиране на физическите процеси на разпространение на сеизмичните вълни в земната кора, които подлежат на формална верификация от мониторинговите системи.

Таблица 4. Сравнение между класическите вероятностна и детерминистична и нео-детерминистичната методики за оценка на сеизмичното натоварване.

	вероятностна (PSHA)	детерминистична (DSHA)	нео-детерминистична (NDSHA)								
Фаза 1	Иден Ег	сеизмични огнища Идентификация на сеизмогенните зони и разломи; Епицентри: Геометрия и фокални механизми:									
Фаза 2	Закон за повтаряемост може да бъде считан линеен, сако когато размерите на разглежданата област са много по-големи от линейните размери на сеизмичните огнища.	Фиксирани магнитуди Фиксирано разстояние Избор на сценарий на земетресение IУправляващо / контролно земетресение/	Сеизмични сценарии– фиксирани магнитуди, разстояния и специфични характеристики на сеизмичното огнище Управляващо / контролно земетресение								
Фаза З	Закони за те представляват функциона. спектрално ускорение на слу разстояние и грешка на изм внасят систематична греш опасност [KI	а затихване - лната зависимост на случайното ичайните променливи, магнитуд, иерванията като по този начин ка в оценката на сеизмичната ügel et al., 2006]	Синтетични земни движения. НЕ СЕ ИЗПОЛЗУВАТ ЗАКОНИ ЗА ЗАТИХВАНЕ.								
Фаза 4	Оценка на сеизмичната опасност като Вероятност за надвишение на дадено ниво на земното движение	Оценка на сеизмичната опасност като фиксирани стойности на дадени параметри на земното движение	Оценка на сеизмичната опасност - Консервативни оценки "Обвивки" на стойностите на параметрите, характеризиращи земното движение								

5. Описание на нео-детерминистичната процедура за моделиране на разпространението на сеизмични вълни в реална хетерогенна геоложка среда.

5.1. Теоретично моделиране на разпространението на сеизмичните вълни – обща постановка.

Движението на частиците на земната повърхност по време на земетресение в следствие разпространението на сеизмичните вълни може да се опише с линейна система от три частни диференциални уравнения с три неизвестни (трите компоненти на вектора на преместването), чиито параметри зависят от пространствени променливи. Приетата предпоставката за много малки премествания и натоварвания (напрежения) с малка продължителност (условия, най-близки до сеизмологичната задача) допуска линейно еластично поведение на твърдата среда. От условието за равновесие на обемните, инерционните и повърхностите сили, действуващи върху единица обем от непрекъсната среда, след прилагане на закона на Хук, получаваме система от уравнения за движения:

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \rho \mathbf{X} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z}$$
$$\rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \rho \mathbf{Y} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z}$$
(1),

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \rho \mathbf{Z} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}$$

Непрекъснатото решение може да бъде представено в интегрална форма. На големи разстояния от огнището, в сравнение с дължината на вълната, основната част от решението се описва с формите на Лъв и Рейли [Levshin, 1973; Aki and Richards, 1980]. Решението се свежда до решаване на две задачи за определяне на собствени стойности за трите компоненти на вектора $F = (F_x, F_y, F_z)$, първата от които описва движението в равнината (*x*, *y*) като *P-SV* вълни при гранично условие за свободна повърхност *z*=0. Вторият проблем за собствените стойности описва случая, когато движението на частиците е ограничено до оста *Y* и определя фазовата скорост и амплитудата на *SH* вълните, което трябва да бъде решено за граничното условие за непрекъснатост и *z* = 0.

За случая на метода за описание на SH и P-SV на вълните в напластено полупространство с множество форми на собствено трептене, хетерогенността във вертикално направление в полупространството може да се моделира със серия N-1 хомогенни хоризонтални пласта, успоредни на свободната повърхност, наслоени върху хомогенно полупространство, където ρ_m , α_m , β_m и δ_m са съответно плътността, скоростите на Р- и S- вълните и мощността на типласт. За формите на Лъв, за всяка граница трябва да бъдат изпълнени две гранични условия: (а) непрекъснатост на преместванията U_v за напречния компонент и (б) непрекъснатост на напреженията σ_{zv} относно тангенциалния компонент на моделираното земно движение. След удовлетворяването на съответните гранични условия и изчисляването на дисперсията на повърхностните вълни за серия форми на собствено трептене [Shwab & Knopoff, 1972; Florsh et al., 1991] могат да бъдат получени и синтетичните сеизмограми в нееластичната среда. Граничните условия за вълните на Релей, които трябва да бъдат удовлетворени за всяка граница са непрекъснатост на компонентите на преместванията и напреженията. Както за формите на Лъв, и тук чрез итерации върху границите можем да построим дисперсионни фунцкии, чиито собствени стойности се асоциират с формите на *P-SV* вълните (формите на Релей). Тази процедура се основава на съвременни изчислителни методи за определяне на дисперсията в нееластична среда, отчитайки много форми на трептене [Panza et al., 2001].

При моделиране на сеизмичния източник като точков, източникът се въвежда като прекъсвания на полетата на преместванията и на напреженията в равнината на разлома. Нормалните напрежения се приемат за непрекъснати напречно на равнината на разлома. Съгласно теоремата на изображението, неразломена среда с подходящо приложени обемни сили може да бъде точен еквивалент на разломената среда с прекъсвания в полетата на преместванията и на срязващите напрежения [Panza et al, 2001 и посочени там лит. източници: Maruyama, 1963; Burridge & Knopoff, 1964]. Използуваната при този метод процедура на Kausel & Schwab [1973] приема, че интересуващите ни периоди и дължини на вълните са големи в сравнение с времето за възникване на земетресение в сеизмичния източник, както и в сравнение с размерите на източника. Следователно функцията на времето в източника, описваща прекъсванията на преместването напречно на разлома, може да бъде апроксимирана със стъпкова функция и източникът да бъде приет за точка в простанството. Предпоставката за непрекъснатост на нормалните напрежения напречно на разлома позволява моделирането на еквивалентните обемни сили в неразломена среда като двоица сили с нулев общ момент. При тази предпоставка и при вече определени собствени стойности и собствени функции става възможно и описанието на преместването във времето за трите компоненти на земното движение във вид на сеизмограми. Асимптотичният израз на преобразуванието на Фурие (ПФ) на преместването $U = (U_x, U_y, U_z)$ на разстояние r от източника може да бъде записано като сумата $U = \sum_{m=1}^{\infty} {}^m U$, където m е индексът на формата. Отделните компоненти на преместването имат вида (2), където индексите R и L се отнасят за съответно за формите на Рейли и Лъв:

$${}^{m}U_{x}(r,z,\omega) = \frac{e^{-i\frac{3}{4}\pi}}{\sqrt{2\pi}} \left[\chi_{R}(h_{s},\varphi)S(\omega) \frac{\sqrt{k_{R}}e^{-ik_{R}r-\omega rC_{2R}}}{\sqrt{r}} \frac{\varepsilon_{o}u_{x}(z,\omega)}{2c_{R}v_{gR}I_{1R}} \right]_{m}$$

$${}^{m}U_{y}(r,z,\omega) = \frac{e^{-i\frac{3}{4}\pi}}{\sqrt{2\pi}} \bigg[\chi_{L}(h_{s},\varphi)S(\omega) \frac{\sqrt{k_{L}}e^{-ik_{L}r-\omega rC_{2L}}}{\sqrt{r}} \frac{u_{y}(z,\omega)}{2c_{L}v_{gL}I_{1L}} \bigg]_{m}$$
$${}^{m}U_{z}(r,z,\omega) = e^{-i\frac{\pi}{2}}\varepsilon_{0}^{-1}{}^{m}U_{x}(r,z,\omega) \tag{2},$$

където:

- S(ω) = |S(ω)|exp[i arg (S(ω))] е трансформация на Фурие на времевата функция на източника, докато χ(h_s,φ) представя азимутната зависимост на възбуждащия фактор [Ben-Menhaem & Harkrider, 1964];
- величините I₁ са енергетичните интеграли, дефинирани като $I_{1L} = \int_0^\infty \rho(z) * (u_z(z)/u_z(0))^2 dz;$ $I_{1R} = \int_0^\infty \rho(z) * (v_1^2(z) + v_2^2(z))^2 dz$

• груповата скорост
$$v_g$$
 от (5.12) може да изчисли аналитично от фазовата скорост $v_g = \frac{c}{1 - \frac{\omega \partial c}{c \partial \omega}}$;

 величината C₂ индикира фазовото затихване и изразява ефекта на нееластичната среда. C₂ може да бъде изчислено по аналитичен път с помощта на различни вариационни техники [Aki & Richards, 1980]; а за формите на Лъв - Florsh et al. [1991].

5.2. Методи за решение на вълновото уравнение.

За намиране на решенията на системата (1) съществуват два основни класа методи, числени и аналитични. Графично резюме на тези методи е показано на фиг. 3. Всеки от тези методи има своите предимства и недостатъци. Един технически критерий за избор на метод за прилагане в конкретния случай е отношението на дължината на сеизмичната вълна към размерите на хетерогенността. За изследването на един комплексен седиментен басейн, например, е целесъобразно да се използуват числени методи. Ако размерите на модела надвишават неколкократно представителната дължина на вълната на изчислявания сигнал, то тогава за предпочитане са аналитичните методи. Хибридните модели съчетават в себе си предимствата на числените и аналитичните методи, в общия случай при тези методи аналитичният подход се използува в частта от огнището до площадката, а численият в рамките на самата площадка.

В групата на аналитичните методи, приложими за решаване на уравненията за движение в среда със слаби хетерогенности се различават два основни класа:

(1) методи основаващи се на теорията на лъчите;

(2) методи на базата на взаимодействието на формите на собствено трептене.

При моделирането на сеизмично натоварване за площадки, които са достатъчно отдалечени от сеизмичното огнище се приема, че повърхностните вълни представляват доминиращата част от сеизмограмата, описващата движението на земната основа, генерирана от това огнище. Найподходящата техника за моделиране на тези вълни се основава на взаимодействието на формите на собствено трептене, при която полето на сеизмичните вълни се описва като линейна комбинация от фундаментални функции, каквито са формите на собствено трептене. В случая на крайно тяло като Земята това е един точен метод, защото формите на трептене формират пълно решение. При апроксимация на средата с хоризонтално наслоено полупространство пълнотата на решението се нарушава, тъй като нормалните форми се асоциират с дискретната част на спектъра. Това ограничение може да бъде преодоляно с въвеждането на допълнителни критерии. В тази група методи се различават три варианта: WKBJ метод, апроксимация на Борн и метод с изчисляване на коефициентите на взаимодействие, който е в основата на използваната процедура. Изчислителният модел при този метод се състои от две хоризонтално наслоени полупространства, които са кораво свързани помежду си. В този случай традиционните методи приемат, че за дадена честота за всяко от двете полупространства съществува пълен набор собствени форми. Когато това условие е задоволено, неизвестните коефициентите на преминаване и отражение могат да бъдат изчислени при предпоставката за непрекъснатост на условията по вертикалната граница.



Фигура 3. Схематичен преглед на методите за решаване на вълновото уравнение в хетерогенна в хоризонтално направление среда [Panza et al., 2001].

5.3. Неодетерминистичен аналитичен метод за генериране на времевите редове, описващи сеизмичното натоварване.

Тази техника се основава на идеята за представяне на вълновото поле, генерирано от хоризонталните хетерогенности на средата, като линейна комбинация от базисни функции, представляващи нормалните форми на трептене (Лъв и Рейли) за разглежданата структура, при което проблемът се свежда до изчисляване на коефициентите на тази комбинация. Ако приемем, че хетерогенната среда е съставена от две слоести четвърт-пространства с корав контакт между тях, както е показано на фиг. 4, традиционният аналитичен метод [Alsop, 1966] приема, че за дадена честота наборът от собствени функции е пълен за всяко от двете четвърт-пространства и тогава неизвестните на задачата, т. нар. коефициенти на отражение и предаване, могат да бъдат изчислени при приемането на подходящи условия за непрекъснатост по вертикалната граница. Този подход е свързан с два проблема: (1) дискретният спектър на собствените функции е непълен за дадени честоти което налага да се включи условие за непрекъснатост на спектъра, което от своя страна изисква тежък изчислителен процес на свързан със сложни повърхностни интеграли; 2) развитието в ред на базисните функции може да бъде направено с краен брой членове, поради което е необходим контрол на въведените апроксимации.





При модалния подход (алтернатива на метода на Alsop) се изчисляват коефициентите на комбиниране на модите, предадени и отразени от вертикалната граница, и излизащите (нехомогенни)

вълни се получават чрез суперпозиция на хомогенните и нехомогенните вълни, прилагайки закона на Snell за всяка секция (приета като безкрайна) на вертикалната граница [Alsop et al., 1974]. Основният недостатък на този метод е неудовлетворяването на хоризонталните гранични условия, поради което някои пречупени вълни в близост до вертикалната граница не се отчитат правилно. Въпреки това, проверката на енергийния баланс между входящите и изходящите вълни дава една количествена оценка на въведените апроксимации.

Използуваната аналитична процедура се основава на формулировките на Gregersen & Vaccari [1993], касаещи *SH* вълните, и на съответните корекции, отчитащи топографските ефекти [Romanelli et al.,1996]. Коефициентите на модите на Лъв са изведени при предпоставката за нормално падане на вълните спрямо вертикалната връзка. Косо падащите вълни са разгледани отделно. Векторите напрежение-преместване асоциирани с преминаващите и отразените вълни могат да бъдат приети като суперпозиция на разпространяващи се вълни от полупространство II и съответно от полупространство I. Във всяка хоризонтална секция преместването в резултат на модите на лъв може да бъде описано като (*3*), където A_s и B_s са константите на слоя, c е фазовата скорост и е β_s скоростта на *S*-вълната в секцията,

$$u_{y}(x, z, t) = [A_{s} \cos(kr\beta_{s}z) + B_{s} \sin(kr\beta_{s}z)]e^{i(\omega t - kx)}$$

(3)

$$r_{\beta_{s}} = \sqrt{\frac{c^{2}}{\beta_{s}^{2}} - 1}; \text{ if } c > \beta_{s} \text{ and } r_{\beta_{s}} = -i\sqrt{1 - \frac{c^{2}}{\beta_{s}^{2}}}; \text{ if } c < \beta_{s}$$
(4).

Така във всяка хоризонтална секция дадена мода на Лъв може да бъде считана като получена при суперпозиция на падащите *SH*-вълни към вертикалната граница между двете полупространства по ъгъл $\theta_s = cos^{-1} \left(\frac{\beta_s}{c}\right)$. Резултантите *SH*-вълни във всяка секция могат да бъдат хомогенни (θ_s - реална) или нехомогенни (θ_s - имагинерна), в зависимот от фазовата скорост с, която е една и съща за всички секции за зададени мода и честота, и от скоростта на S-вълните, и която обикновено е различна за различните секции. Коефициентите на предаване и отражение могат да се изчислят за всяка хоризонтална секция съгласно закона на Snell, който е валиден за безкрайна повърхност на контакта. Процедурата е приблизителна, тъй като хоризонталните гранични условия не са удовлетворени и всички пречупени вълни са включени в изчисленията.

Коефициентите на комбиниране на предаване като например величината, която описва към амплитудата на мода *m* в полупространство II е възбудена от падащата мода *m* от полупространство I [Vaccari et al., 1989]:

$$\gamma_T^{(m,m')} = \frac{\langle A_T^{(m)}, A_{II}^{(m)} \rangle}{\langle A_I^{(m)}, A_I^{(m)} \rangle^{1/2} \langle A_{II}^{(m')}, A_{II}^{(m')} \rangle^{1/2}}$$
(5).

Разглеждането на падащата мода като мода с единична повърхностна амплитуда изисква въвеждането на нормализиращ коефициент, за което се използува величината описана с (5.17),

$$\Gamma_T^{(m,m')} = \gamma_T^{(m,m')} \frac{\langle A_I^{(m)}, A_I^{(m)} \rangle^{1/2}}{\langle A_{II}^{(m')}, A_{II}^{(m')} \rangle^{1/2}} = \frac{\langle A_T^{(m)}, A_{II}^{(m)} \rangle}{\langle A_{II}^{(m')}, A_{II}^{(m')} \rangle}$$

(6).

Коефициентите на комбиниране на отражение се дефинират като:

$$\gamma_{R}^{(m,m')} = \frac{\langle A_{R}^{(m)}, A_{I}^{(m)} \rangle}{\langle A_{I}^{(m)}, A_{I}^{(m)} \rangle^{\frac{1}{2}} \langle A_{II}^{(m')}, A_{II}^{(m')} \rangle^{\frac{1}{2}}}$$

(7)

при следната дефиниция на падаща мода с единична повърхностна амплитуда

$$\Gamma_{R}^{(m,m')} = \gamma_{R}^{(m,m')} \frac{\langle A_{II}^{(m')}, A_{II}^{(m')} \rangle^{1/2}}{\langle A_{I}^{(m)}, A_{I}^{(m)} \rangle^{1/2}} = \frac{\langle A_{R}^{(m)}, A_{I}^{(m)} \rangle}{\langle A_{I}^{(m)}, A_{I}^{(m)} \rangle}$$
(8)

Изразът (8) и ортогоналността на модите за фиксирана честота [Romanelli, 1996] показват, че само ненулевите коефициенти на отражение имат отношение към едноименните форми като например коефициентите на междинно комбиниране. И така векторите напрежение-деформация за вълните на Лъв се описват с изразите (9), тъй като в случая на нормално падаща вълна няма трансформация на *SH*- в *SV*-вълни.

$$A_{I} = (0, u_{yI}, 0, 0, \sigma_{yxI}, 0);$$

$$A_{II} = (0, u_{yII}, 0, 0, \sigma_{yxII}, 0); A_{T} = (0, u_{yT}, 0, 0, \sigma_{yxT}, 0)$$
(9).

Аналитичното решение за P-SV вълните е разработено от Vaccari et al. [1989] за среда на Поасон и по-късно е разширено за не-Поасонова среда от Romanelli et al. [1997]. След като са изчислени коефициентите на взаимодействие между формите на трептене (модите) на Лъв и Релей могат да бъдат изчислени преместванията на земната основа, в следствие разпространението на модите на вълните на Лъв и Релей в хетерогенна среда [Levshin, 1985]. Преместването в трансверзално направление спрямо движението в сеизмичния източник, асоциирано с мода на Лъв *m* и предадено на мода *m*' на разстояние от *r* източника има следния вид:

$${}^{m,m'}U_{y}(r,z,\omega) = \frac{\exp\left(-i3\pi/4\right)}{\sqrt{8\pi}} \left[\frac{\chi_{L}(h_{s},\varphi)S(\omega)}{c_{L}\sqrt{v_{g,L}I_{1,L}}}\right]_{m}$$

$$\frac{\exp\left[-i(k_{L}d + k'_{L}d) - \omega(dC_{2L} + d'C'_{2L})\right]}{\sqrt{d/k_{L}} + d'/k'_{L}}\gamma_{TL}^{(m,m')}\right]_{mm'} \left[\frac{u_{z}(z,\omega)}{\sqrt{v_{g,L}I_{1L}}}\right]_{m'}$$
(10)

Аналогично се изразяват радиалния (11) и вертикалния (12) компонент на земното движение:

$${}^{m,m'}U_{x}(r,z,\omega) = \frac{\exp\left(-i3\pi/4\right)}{\sqrt{8\pi}} \left[\frac{\chi_{RL}(h_{s},\varphi)S(\omega)}{c_{R}\sqrt{v_{g,R}I_{1,R}}}\right]_{m}$$

$$\left[\frac{\exp\left[-i(k_{R}d + k'_{R}d) - \omega(dC_{2R} + d'C'_{2R})\right]}{\sqrt{d/k_{R}} + d'/k'_{R}}\gamma_{TR}^{(m,m')}\right]_{mm'} \left[\frac{u_{z}(z,\omega)}{\sqrt{v_{g,R}I_{1R}}}\right]_{m'}$$

$${}^{(11)}$$

(12).

6. Избор на сеизмични сценарии за сеизмичен източник Вранча. Дефиниране на параметрите на изчислителния модел за прогнозна оценка на сеизмичното натоварване за избраните сеизмични сценарии.

6.1. Дефиниране на сценарии за очаквани сеизмични въздействия

Съвременният опит предлага четири нива на сеизмични сценарии, свързани с общоприетите характеристики на сеизмичното огнище: разрушително земетресение с период на повтаряемост ~ 500 години; много силно земетресение с период на повтаряемост ~ 200 години; силно земетресение с период на повтаряемост ~ 125 години; често възникващо земетресение с период на повтаряемост ~ 60 години. В таблица 5 са дадени сеизмичните събития със сеизмичен източник Вранча, които са използувани за моделиране и верификация на сеизмичното натоварване в североизточна България, както и сеизмичните сценарии за прогнозни оценки при различни нива на сеизмична опасност. За високомагнитудните събития разумните сценарии съответствуват на период на повтаряемост 50 - 200 години, т.е. магнитуди М = 7.2 (силно) и М = 7.8 (екстремно) [Georgescu & Sandi, 2000].

6.2. Изчислителен модел

Изчислителният модел описва пътя на разпространение на сеизмичните вълни от огнището до съответната площадка. Той обхваща два свързани структурни модела, представени като хоризонтално наслоени попу-пространства с корава връзка между тях, както е показано на фиг. 5. Основната скала, фиг.6, вмества сеизмичното огнище и пътят на разпространение на сеизмичната вълна. Точките, в които са изчислени сеизмичните сигнали са наречени изчислителни станции. Епицентралните разстояния варират от 213 до 250 км.

Сеизм. събитие Геогр Шир. Геогр Маг-нитуд Фок. Посока Наклон Прем							
	[°N]	Лъпж	Mw	лъпб	(strike) [º]	(dip)	(rake)
	[]	[ºE]		km	(0	[º]	[0]
VR401	45.80	26.70	7.7 - 7.8	150	225	60	80
VR77 ²	45.23	26.17	7.5	83.6	235	62	92
Грешка				1.1			
VR86 ²	45.76	26.53	7.2	132.7	240	72	97
Грешка				1.1			
VR901 ²	45.92	26.81	6.9	76.3	236	63	101
Грешка				0.7/16.0			
VR901 ³	45.83	26.89		90.9			
Грешка	2.7km	2.2km		6.4			
VR902 ²	45.67	26.00	6.3	87.3	309	69	106
Грешка				1.3			
VR9023	45.85N	26.91E	6.4	86.9			
Грешка	3.7km	3.3km	0.1	7.2			
Sce_1 ²	45.76	26.53	7.2	132.7	240	72	97
Sce_2 ^{1,4}	45.80	26.70	7.8	150.0	225	60	80

Таблица 5. Сеизмични събития, използувани за моделиране на сеизмичното натоварване.

* Radulian et al, [2000]; ** Dzievonsky et al, [1991], *** Oncescu et al., [1999], Sce_1** - 30.08.1986, [Dziewonsky et al. 1991], Sce_2*, **** 10.11.1940, [Radulian et al., 2000; Lungu et al.2004].



Фигура 5. Използуван изчислителен модел.

Моделът на локалната площадка отразява наличната информация за земната основа на гр. Русе. Най-обща оценка на земната основа в гр. Русе показва разпръснати седиментни отложения залягащи върху скалния фундамент. Според класификацията на повърхностните геоложки условия на земната основа, на Еврокод 8, разглежданата плошадка в гр. Русе съотвествува на клас С. Локалните модели, използувани за параметричните анализи и прогнозните оценки са дадени в таблица 6.



Основна скала

thk(km) rho Vp(km/s) Vs(km/s) 0.9000 2.250 2.000000 1.155000 1.1000 2.250 2.500000 1.500000 1.1000 2.450 3.300000 1.830000 3.6000 2.450 3.500000 2.030000 3.6000 2.480 6.500000 2.620000 5.1000 2.480 6.800000 2.800000 5.1000 2.600 5.300000 3.000000 12.2000 2.600 5.500000 3.170000 12.2000 2.700 5.900000 3.450000 30.7000 2.850 6.700000 3.900000 40.7000 2.850 7.00000 6.030000 40.7000 3.250 7.900000 6.400000

забележка

Фигура 6. Изчислителен модел за основна скала [Cioflan, 2003].

No	Модел	Клас земна	Скор	остен модел
		основа, ЕС 8	V₅³0 [m/s]	Vp [m/s]
4			000	1000

Таблица 6. Локални структурни модели съгласно Еврокод ЕС8

		основа, ес 8	V _s ³⁰ [m /S]	vp [m/s]	H,[M]	
1	rs1As, rs5As	Α	800	1600	30	плитки
2	rs1Bs, rs5Bs	В	385	770	30	
3	rs1Cs, rs5Cs	С	325	650	30	
4	rs1As, rs5As	Α	800	1600	60	средно дълбоки
5	rs1Bs, rs5Bs	В	385	770	60	
6	rs1Cs, rs5Cs	С	325	650	60	
7	rs1Ad, rs5Ad	Α	800	1600	150	дълбоки
8	rs1Bd, rs5Bd	В	385	770	150	
9	rs1Cd, rs5Cd	С	325	650	150	

7. ГЕНЕРИРАНЕ НА СИНТЕТИЧНИ СИГНАЛИ ЗА ПЛОЩАДКАТА ГР. РУСЕ. ВЕРИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ.

За целите на това изследване са генерирани теоретични сеизмични сигнали съгласно сеизмичните сценарии и изчислителните модели дефинирани в глава 6. Използуваната изчислителна процедура и съответната програмна реализация са разработени от международен изследователски екип във факултета "Науки за земята" (сега "Гео- и математически науки") в университета в Триест в сътрудничество с международния център по теоретична физика в Триест (ICTP), Италия [Romanelli et al., 1996, 1997; Panza et al., 2001]. Изчисленията са проведени в рамките на съвместни научно-изледователски проекти с участието на ЦЛСМСИ-БАН (сега Департамент "Сеизмично инженерство", НИГГГ-БАН) и Университета в Триест.

В резултат от проведените числени експерименти са получени акселерограми, велосиграми и сеизмограми, описващи движението на земната основа при разпространението на P-SV и SH вълни в тази среда. Представени са резултати от следните числени експерименти:

- изчисляване и верификация на сеизмичното въздействие за регистрираща станция Русе за вранчанските земетресения от 30.08.1986 г. и 30.05.1990 г.;
- параметрични анализи на сеизмичното въздействие при вариране на (1) параметрите, описващи сеизмичния източник и (2) геомеханичните параметри, описващи локалните геоложки модели;
- прогнозна оценка на сеизмичното натоварване и реагирането на земната основа за дефинираните сеизмични сценарии за силно и екстремно сеизмично събитие.

7.1. Верификация на резултатите от моделирането

Верификацията на теоретично получените сигнали е извършена като получените резултати са сравнени с наличните инструментално записани акслерограми за силните земетресения VR86 и VR901 във времева и в честотна област. Основната верификация на резултатите е извършена за сигналите с честотно съдържание 0-1 Hz.

Теоретичните акселерограми за трите компоненти на сеизмичното натоварване от земетресението VR86 и VR901 (фокално дълбочини H = 74км и H=90км), спектрите на Фурие и спектрите на реагиране на ускорения при 5 % затихване са сравнени с тези на наличния запис в станция Русе, филтриран в честотна лента 0-1 Hz, фиг.7.



Фигура 7. Площадка Русе; земетресение Вранча 30.08.1986 (VR86). Горе: Сравнение между записани (ляво) и теоретични (дясно) акселерограми. Долу ляво: Сравнение на спектрите на Фурие на теоретични (плътна линия) с регистрация (пунктир. линия). Долу дясно: Сравнение на спектри на реагиране на ускорения на теоретични (плътна линия) с регистрация (пунктир).

Резултатите от параметричните анализи, фиг. 8 - 12, показват, че трансверзалният компонент е видимо азимутално по-чувствителен в сравнение с другите компоненти на земното движение и практически не се влияе от промените в наклона и преместването в източника. Радиалният и вертикалният компоненти се оказват силно чувствителни по отношение промените в наклона и преместването в сеизмичния източник. За теоретичните и записаните сеизмични сигнали са изчислени пикови и интегрални параметри: PGA, PGV, PGD, PGV/PGD, I_A, A₉₅, SA, β, I_D, T_p Сравнението на тези стойности за теоретично получените и записаните акселерограми е показано в таблици 7 и 8.



Фигура 8. Площадка Русе, Вранчански земетресения параметричен анализ – вариация на посоката (strike). Плътна линия: трансверзален компонент; пунктир: радиален компонент.



Фигура 9. Площадка Русе, Вранчански земетресения параметричен анализ – вариация на разстояние (rake). Плътна линия: трансверзален компонент; пунктир: радиален компонент.



Фигура 10. Площадка Русе, Вранчански земетресения параметричен анализ – вариация на наклон (dip). Плътна линия: трансверзален компонент; пунктир: радиален компонент.



Фигура 11. Площадка Русе, Вранчански земетресения параметричен анализ – вариация на епицентрално разстояние. Плътна линия: трансверзален компонент; пунктир: радиален компонент.



Фигура 12. Площадка Русе, Вранчански земетресения параметричен анализ – вариация на фокална дълбочина. Плътна линия: трансверзален компонент; пунктир: радиален компонент.

Графиките, показани на фиг. 9 – 13 показват ясното влияние на сеизмичния източник върху сеизмичното натоварване. Всички изчисления до тук са проведени без модифициране на входните данни – всички използувани данни са взети от публикувани литературни източници.

Резултатите от сравнението на стойностите на параметрите на земното движение за теоретичните и записаните сигнали показват най-добро съвпадение за максималното ускорение за трансверзалния компонент PGA^T = 13.90 cm/s² и PGA^{запис} = 14.10 cm/s².

Последна стъпка от параметричните анализи е оценка на влиянието на класа земна основа на локалната площадка съгласно класификациите на Еврокод 8. На фиг. 14 са показани спектри на реагиране, изчислени за различни фокални механизми и различни класове земна основа – А, В и С.

Михаела Кутева-Генчева



Фигура 13. Плошадка Русе. Спектри на реагиране за затихване 5% при вариране на параметрите на сеизмичното огнище (таблица 7.3) Ляво: трансверзален компонент; Дясно: радиален компонент. Плътна черна линия: стартов фокален механизъм (СМТ), плитък локален модел.

SA	Computed Values SA MAX, [CM/S ²]											OBS	
MAX,													
[CM/S ²]													
VR90	STF	RIKE, STR	, [⁰]	DE	ртн, <mark>Н</mark> , [I	KM]	Ľ)IP, DIP, [0]	RA	AKE, RAK,	STR=41,	
	H=	90. DIP=	63.	STR	=41, DIP:	=63.	STF	R=41, H=	-90,	STR=4	1. <i>H=90</i> .	DIP=63	H=90,
		RAK=101	1		RAK=101	ý		RAK=101	1		, ,		DIP=63,
	310	4 1 °	51 ⁰	60	70	90	<i>53</i> °	<i>63</i> ⁰	730	91 ⁰	1010	1110	RAK=101
TRA	35.0	39.7	40.8	34.4	47.3	39.7	43.8	39.7	34.4	36.8	39.7	37.6	38.8
RAD	26.3	29.2	33.6	28.8	31.4	29.2	38.0	29.2	20.0	47.4	29.2	15.5	45.1
VRT	19.1	21.2	24.3	19.6	12.2	21.2	27.5	21.2	14.2	31.6	9.61	21.2	11.4
VR86	STF	RIKE, STR	, [⁰]	<i>Dертн, Н</i> , [км]			DIP, DIP, [⁰]			RAKE, RAK, [⁰]			STR=50,
	H=	133, DIP=	=72,	STR	STR=50. DIP=72.			STR=50, H=133,			=50, H=	133,	H=133,
		RAK=97			RAK=97			RAK=97			DIP=97	-	DIP=72,
	<i>40</i> ⁰	<i>50</i> °	600	123	133	143	620	720	<i>82</i> °	87º	<i>97</i> ⁰	107º	RAK=97
TRA	174.4	167.3	147.6	139.1	167.3	195.7	168.5	167.3	146.9	167.7	167.3	161.8	
RAD	48.9	53.5	62.1	40.1	53.3	77.6	162.2	53.3	72.4	91.7	53.3	27.2	
VRT	33.5	37.9	43.2	32.7	37.9	10.8	67.9	37.9	20.5	48.9	37.9	26.0	17.2
FW	27.5	33.7	62.6	30.4	33.7	43.9	131.5	33.7	92.5	637	337	24.0	48.5

Таблица 7.1. Сравнение на теоретичните стойности (computed) на спектралните ускорения и съответните им стойности за записаните (OBS) акселерограми : SA MAX, [CM/S²]

Таблица 7.2. Сравнение на теоретичните стойности PGA, PGV, PGD, PGV/PGD, I_A, A₉₅ (Vrs2dh1* - сивите редове) и съответните им стойности за записаните (Rsf010*) акселерограми.

Ground motion component	PGA [cm/s²]	PGV [cm/s]	PGD [cm]	Arias Intens. cm/s	A95 [g]	PGV/ PGA [s]	PGA [cm/s ²]	PGV [cm/s]	PGD [cm]	Arias Intens. cm/s	A95 [g]	PGV/ PGA [s]
1	2	3	4	6	7	8						
Frequency c	ontent 0	- 1 Hz					Frequer	ncy conte	ent 0 - 2	2 Hz		
TRA												
Vrs2dh1t	13.90	3.01	0.94	0.228	0.014	0.216	52.80	12.40	3.85	3.763	0.052	0.235
Rsf010t	14.10	2.95	0.80	0.414	0.014	0.209	29.40	4.66	1.04	1.714	0.029	0.159
RAD												
Vrs2dh1r	4.38	1.02	0.25	0.064	0.004	0.233	16.70	2.38	0.45	0.494	0.016	0.142
Rsf010r	9.40	2.50	0.96	0.246	0.009	0.266	18.20	2.40	0.93	0.657	0.018	0.132
VER												
Vrs2dh1v	1.90	0.45	0.19	0.021	0.002	0.237	6.30	0.94	0.19	0.080	0.006	0.149
Rsf010v	3.90	0.95	0.48	0.060	0.004	0.244	7.80	0.95	0.48	0.150	0.004	0.121

7.2. Прогнозни оценка на сеизмичното натоварване за СИ България за сценарий на силно и екстремно силно земетресение със сеизмичен източник Вранча.

Прогнозните оценки на динамичния коефициент, основани на изчислените спектри на реагиране на ускоренията при 5% затихване, за силно и екстремно земетресение със сеизмичен източник Вранча за различни типове земна основа и различни епицентрални разстояния, съответствуващи на площадки на територията на България, са показани на фигури 14 (силно събитие) и 15 (екстремно събитие). На същите фигури е изчислителното сеизмично въздействие е сравнено с предписанията на Еврокод 8.



Фигура 14. Сценарий на силно земетресение със сеизмичен източник Вранча. Сравнение на изчисления динамичен коефициент с препоръките на Еврокод 8.





8. Изводи и заключения

8.1. Основни изводи

Моделирането на сеизмичното натоварване от силните междинно-фокусни вранчански земетресения е проведено използувайки аналитична нео-детерминистична процедура. Изборът на процедурата за моделиране и оценка се основава на проведения сравнителен критичен анализ на съвременните методи за моделиране на сеизмичното въздействие. Този метод се основава на наличните публикувани данни за сеизмичността, сеизмичното огнище и геологията на района и на локалната площадка, без да изискват специални геоложки проучвания. Основно предимство на избрания аналитичен нео-детерминистичен метод е едновременното отчитане на: (1) кинематиката на разпространение на сеизмичните вълни от огнището до площадката и (3) характеристиките на конкретната площадка;

Проведените параметрични анализи показват, че промените в геометрията и кинематиката на сеизмичното огнище в разумно допустимите им граници в модела на сеизмичния източник оказват влияние върху амплитудата на сигнала без да променят качествено спектъра на сеизмичното въздействие. Неточностите в определянето на фокалната дълбочина на земетресението имат найголямо влияние върху вълновите форми в сравнение с останалите параметри. Дълбочината на локалните модели влияе видимо върху вълновата форма на сеизмичния сигнал.

Прилагането на нео-детерминистичната процедура дава възможност за оценка на реагирането на площадката. Нерегулярното усилване на сеизмичния сигнал в земната основа, дори и при използувания силно опростен локален модел, потвърждва комплексния характер на регирането на площадката като резултат от процеса на разпространение на сеизмичните вълни (преминаване, пречупване и отражение) от сеизмичния източник до локалната площадка.

Дефинирани са два принципни сеизмични сценария за прогнозна оценка на сеизмичното натоварване в България за силните средно дълбоки земетресения с огнище Вранча: силно земетресение с магнитуд M = 7.2 и разрушително земетресение с магнитуд M = 7.8. За дефинираните сценарии са получени теоретични акселерограми, велосиграми и сеизмограми за три различни класа земна основа, съгласно класификациите на Еврокод 8 (А, В и С) и различни епицентрални разстояния (200 – 400 km). Получените прогнозни оценки показват, че процедурата може да предложи резултат, който съответствува на нормативните натоварвания и следователно може да бъде използувана като възможност за генериране на синтетични /теоретични/ сеизмични въздействия за целите на инженерната практика. Резултатите показват, че при дефинирането на сеизмичното натоварване за сгради и съоръжения с големи собствени периоди е необходимо да се обръща специално внимание на вранчанските земетресения.

Проведените анализи на данните, получените резултати от парамететричните анализи и прогнозните оценки на сеизмичното натоварване за територията на България от силните среднодълбоки вранчански земетресения са използувани при обосновката на необходимостта от специален проектен спектър, касаещ вранчанските земетресения и предложение на спектър тип 3 в Националното приложение на Еврокод 8.

8.2. Направления за бъдещо развитие на работата по темата на докторантурата и използуване на получените резултати.

Генерираните синтетични сигнали, акселерограми, велосиграми и сеизмограми, описващи земното движение по време на земетресение, могат да бъдат директно използувани за прогнозни оценки на сеизмичното натоварване за целите на строителното проектиране, градустройството и планирането на

застрояването; подготовката за защита при бедствия и съпровождащите ги потенциални аварии. Синтетичните сеизмични времеви редове могат да бъдат използувани директно като входно натоварване при инженерни анализи на различни строителни конструкции, както и за оценка на индекса на повреди.

Анализът на генерираните велосиграми позволява изчисляване на максималните скорости на частиците на свободна повърхност на земната основа. Тези максимални скорости могат да бъдат използувани за оценка на деформациите на земната повърхност, а оттам и за оценката на очаквания брой сгради с опасни повреди и др. (Trifunac & Todorovska, 1997). Възможността за оценка на повърхностните деформации е особено важно при дълги в план строителни конструкции.

Използуваната нео-детерминистична процедура за оценка на сеизмичното натоварване може да бъде приложена непосредствено за целите на микросеизмичното райониране, свързвайки области с даден тип локална геология със съответни стойности на различни параметри на земното движение като спектрално ускорение (S_a), спектрално преместване (S_d) или диаграмата S_a-S_d.

Организацията на получените резултати (акселерограми, велосиграми и сеизмограми) в автоматизирана база данни ще позволи автоматизирана количествена оценка на редица параметри на земното движение, които са от значение при оценката на сеизмичния риск.

Основни научни и научно-приложни приноси

- Дисертационният труд представя резултати и анализи от първото приложение на аналитичната неодетерминистична процедура за моделиране и прогнозна оценка на сеизмичното натоварване на площадки, разположени на големи епицентрални разстояния (~200 km) при фокална дълбочина на земетресенията ~120-130 km. Това е и първото приложение на този съвременен метод за моделиране на разпространението на сеизмични вълни в реална хетерогенна геоложка среда за територията на България.
- II. Установено е, че геометрията и кинематиката на сеизмичния източник влияят върху промените на амплитудата на сеизмичния сигнал от силните междинно фокусни вранчански земетресения, без да променят честотното съдържание на сигнала.
- III. Честотното съсдържание и вълновите форми на сеизмичното натоварване от силните междинно фокусни вранчански земетресения се влияят в съизмерима степен от характеристиките на модела на локалната площадка и от фокалната дълбочина.
- IV. Дефинирани са два принципни сеизмични сценария за прогнозна оценка на сеизмичното натоварване в България за силните средно дълбоки земетресения с огнище Вранча:
 - (1) силно земетресение с магнитуд М = 7.2;
 - (2) разрушително земетресение с магнитуд M = 7.8.
- V. Проведените анализи и получените резултати са използувани при обосновката на необходимостта от отделен проектен спектър за вранчанските земетресения и формулирането на предложението за спктър от тип 3 в Националното приложение на Еврокод 8 у нас.

Публикации по дисертацията

- <u>Kouteva-Guentcheva, M.</u> (2010) Estimates of some ground motion parameters, related to thedamage potential of strong intermediate-depth Vrancea earthquakes, AGGH, Ref.: Ms. No. AGEOD-D-10-00014R1.
- 2. <u>*M. Kouteva-Guentcheva*</u>, I. Paskaleva (2010) Съвременни методи за алтернативно представяне на сеизмичното натоварване, Международна конференция DCB 2010, 9-11.09.2010, Варна.
- Kostov, M., Paskaleva I., Koleva N., <u>Kouteva M.</u>, Simeonov S. (2010) Дефиниране на сеизмичното натоварване за целите на Националното приложение на Еврокод 8 за територията на Р България Международна конференция DCB 2010, 9-11.09.2010, Варна.
- G.F. Panza, M. Radulian, T. Kronrod, I. Paskaleva, Sl. Radovanovic, M. Popa, A. Drumea, K. Gribovszki, D. Dojchinovski, <u>M. Kouteva</u>, P. Varga, L. Pekevski, Integrated Unified Mapping of the Vrancea Macroseismic Data for the CEI Region, 14ECEE, paper ref. 301, 30.08-2.09.2010, Ohrid, FYR Macedonia.
- Ivanka Paskaleva, <u>Mihaela Kouteva</u>, Giuliano F. Panza, and Franco Vaccari (2010) Characterization of the Elastic Demand: Case Study – Sofia City, Fifth Int. Conf. on Recent Advances in geotechnical Earthquake engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honour of Prof. I.M.Idriss, may 24-29, San Diego, California, Marriott Mission Valley, paper ref. 6.06b.

Литература

- 1. А.А. V.V. Бранков Г. (ред.) Земетресението Вранча 1977 год. Последствия в НР България (1983). Бранков Г., Бончев Е., Игнатиев Н., Бончева Х., Христосков Л., Паскалева И., БАН, София, 428 с.
- Рижикова Сн. (1983) Макросеизмични наблюдения и карти. В: "Земетресението Вранча 1977 г. Последствия в НР България", под редакцията на Г. Бранков, Е. Бончев, Н. Игнатиев, Х. Бончева, Л. Христосков, И. Паскалева, Изд. БАН, София, 135-150.
- 3. Христосков, Л., (2005), Сеизмология, част I, Сеизмични вълни в изотропни среди, Изд СУ "Св. Кл. Охридски", София, 362 с.
- 4. Христосков, Л., (2005), Сеизмология, част I I, Сеизмични вълни в изотропни среди, Изд СУ "Св. Кл. Охридски", София, 450 с.
- Христосков Л. (1983), Сеизмология. Сеизмични въздействия в територията на България. Спектрални свойства на излъчените вълни. В: "Земетресението Вранча 1977 г. Последствия в НР България", под редакцията на Г. Бранков, Е. Бончев, Н. Игнатиев, Х. Бончева, Л. Христосков, И. Паскалева, Изд. БАН, София, 167-175.
- 6. Aki K- and Richards, P. G. (1980), Quantitative Seismology, Freeman and Co., San Francisco.
- 7. Alkaz V. (2005), Seismic Hazard and Risk Studies in republic of Moldova, Proc. CEI Conference, Science and Technology for Safe Development of Lifeline Systems October 24-25, 2005, Bratislava, Slovak Republic.
- 8. Alsop, L. E. (1966). Transmission and reflection of Love waves at a vertical discontinuity, *Geophys. Res., 71*,3969-3984.
- 9. Alsop, L. E., Goodman, A. S. and Gregersen, S. (1974). Reflection and transmission of inhomogeneous waves with particular application to Rayleigh waves, *Bull.Seism. Soc. Am., 64*,1635-1652.
- 10. Ambraseys, N., Smit, P., Sigbjornsson, R., Suhadolc, P. and Margaris, B. (2002), Internet-Site for European Strong-Motion Data, European Commission, Research-Directorate General, Environment and Climate Programme.
- 1. Arias A. (1970) A measure of earthquake intensity. In: Seismic design of nuclear power plants. Cambridge, MA: MIT Press. 1970. 438–468.
- 2. A.A. V.V., (1982), Cutremurul de pamint din Romania de la 4 martie 1977 (Balan St., Criestescu V., Cornea I. Editors), Editura Academiei, Rep. Soc. Romania, Bucuresti, 516 p.
- 3. A.A.V.V., (2000), Seismic hazard of the Circum-Pannonian region, (G. F. Panza, M.Radulian and C.-Y. Trifu editors), PAGEOPH special issue,279 p.
- 4. A.A V.V., (1999), Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation, (F. Wenzel, D. Lungu (eds.) & O. Novak (co-ed)), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 374p.
- 5. Ben-Menhaem, A. and Harkrider, D. G. (1964), Radiation patterns of seismic surface waves from buried dipolar point sources in flat stratified media, Bull. Seism. Soc. of Am., Vol. 69,2605-2620.
- 6. Burridge, R. and Knopoff, L. (1964). Body force equivalents for seismic dislocations, BSSA, 54,1875-1888.
- 7. Cosenza, E., & Manfredi, G. (2000) Damage indices and damage measures, Prog. Struct. Eng Mater. 2000; 2: 50–59.
- 8. Dziewonsky A. M., Ekstrom, G., Woodhouse, J. H., Zwart, G. (1991), Centroid moment tensor solutions for April-June 1990, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 66, p. 133 143.
- 9. Florsch, N., Fah, D., Suhadolc, P. and Panza, G. R, (1991) Complete synthetic seismograms for high-frequency multimode SH-waves, PAGEOPH, 136,529-560.
- 10. Frantisec Gallovic (2006) Kinematic Modelling of Strong Ground Motion, Doctoral thesis, Charles Univ., Prague.
- 11. Georgescu E.S and Sandi H. (2000). Towards Earthquake Scenarios under the Conditions of Romania. Proceedings of the 12 WCEE, January, 2000, Auckland, New Zealand, Pap. No.1699.
- 12. Gregersen S. and Vaccari, F., (1993), Lg-wave modelling for the North Sea, Geophys. J. Int., 114, 76-80.
- 13. Gusev A., Radulian M., Rizescu M., Panza G.F. (2002). Source scaling for the intermediate-depth Vrancea earthquakes, Geophys. Int. J. 151, 879-889.
- 14. Kausel, E. and Schwab, F., (1973), Contributions to Love wave transformation theory: earth flattening transformation for Love waves from a point source in a sphere, Bull Seism. Soc. Am., 63,983-993.
- 15. Klügel J.-U. Mualchin L., Panza G.F. (2006), A scenario-based procedure for seismic risk analysis, Engineering Geology 88 (2006) 1–22, available online at www. sciencedirect.com.
- 16. Klügel, J. -U. (2007 a) Error inflation in Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Engineering Geology 90 (2007) 186-192, available online at www. sciencedirect.com
- 17. Klügel, J. -U. (2007 b) Comment on "Why Do Modern Probabilistic Seismic-Hazard Analyses Often Lead to Increased Hazard Estimates" by Julian J. Bommer and Norman A. Abrahamson, BSSA, Vol. 97, No.6, pp.-, comment, doi: 10.1785/0120070018.
- 18. Levshin, A. L. (1973). Surface and Channel Seismic Waves. Moscow,. *Nauka* (in Russian).

- 19. Levshin, A. L. (1985), Effects of lateral inhomogeneities on surface wave amplitude measurements, *Ann. Geophys.*, 3, 511–518.
- 20. Lungu, D. & Aldea, A., (1999), Understanding Urban Risk Around the World. United Nations RADIUS Project at Geohazards Int., Ca., USA. Document City of Bucharest Seismic Profile, 29p. +25p. +8p.
- 21. Lungu D. (2004), Seismic risk mitigation in the Vrancea region, Romania, Hazard Risk Mitigation in Europe and Central Asia, WORLD BANK Workshop, Istanbul, June 28-30, 2004.
- 22. Maruyama, T., (1963), On the force equivalents of dynamical elastic dislocations with reference to the earthquake mechanism / Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ., 41,467-486.
- 23. Nenov D, Georgiev G, Paskaleva I, Lee V W, Trifunac M., 1990. *Strong Ground motion data in EQINFOS: accelerograms recorded in Bulgaria between 1981-1987*, Bulg. Acad. of Sci., Centr. Lab. for Seism. Mech. And Eq. Eng., & Dept. of Civ. Eng. Dpt. No 90-02, Univ. of S. California, L. A., California.
- 24. Oncescu, M.C., Marza, V.I, Rizescu, M., Popa, M. (1999), The Romanian Earthquake Catalogue between 984-1997, in Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation, F. Wenzel, D. Lungu (eds.) & O. Novak (co-ed), pp. 43-47, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. www.infp.ro/Labs/catal.htm
- 25. Panza, G.F., Romanelli, F., Vaccari, F. (2001), "Seismic wave propagation in laterally heterogeneous anelastic media: theory and applications to the seismic zonation", *Advances in Geophysics,* Academic press; 43: 1-95.
- 26. Panza, G.F., Vaccari F. (2000), Introduction in seismic hazard of the Circum-pannonian region (Editors:Panza,GF., Radulian,M., Trifu.C.), *Pageoph Topical Volumes*, Birkhauser Verlag: 5-10.
- 27. Paskaleva I., Kouteva M., Panza G. F., Evlogiev J., Koleva N., Ranguelov N. (2001), Deterministic approach of seismic hazard assessment in Bulgaria; case study in NE Bulgariia the town of Russe, AJNTS, 2001 (1), *Albanian Academy of Sciences*, Maluka, Tirana, 51-73.
- Paskaleva I. (2004), Assessment of the Design Parameters for North-East Bulgaria on the Recorded Accelerograms During 1986 and 1990 Vrancea Earthquakes, ESC General Assembly Papers, Potsdam 2004, http://www.escweb.org/papers/potsdam_2004/esc_papers_potsdam.htm.
- Radulian M, Mandrescu N, Panza G.F, Popescu E, Utale A. (2000), Characterization of the Seismogenic Zones of Romania. In: Panza G. F, Radulian M, Trifu C, Editors. Seismic Hazard of the Circum-Pannonian Region, *PAGEOPH Topical volumes* 157 (1/2). Basel: Birkhauser Verlag, 2000: 57-79.
- 30. Raykova R., Panza G. F. (2006), Surface Waves Tomography and Non-linear Inversion in the Southeast Carpathians. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 157 (2006) 164–180.
- 31. Romanelli, F. Bing, Z., Vaccari, F. and Panza, G.F. (1996), Analytical computation of reflection and transmission coupling coefficients for Love waves, *Geophys. Int.*, 125,132-138.
- 32. Romanelli F., Bekkevold J. and Panza, G.F. (1997), Analytical computation of coupling coefficients in non-poissonian media, *Geophys. J. Int.*, 129,205-208.
- Saragoni GR. (1990), Response spectra and earthquake destructiveness. In:Proceedings 4th US National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, USA, 20–24 May 1990. Berkeley, CA: Earthquake Engineering Research Institute (EERI).1990. 35–43.
- 34. Simeonova S. D., Solakov D. E., Leydecker G., Busche H., Schmitt T., Kaiser D. (2006), Probabilistic seismic hazard map for Bulgaria as a basis for a new building code, *Nat. Hazards Earth Syst.* Sci., 6, 881–887, 2006, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/6/881/2006/
- 35. Todorovska, M., Paskaleva I., Glavcheva R., (1995), Earthquake source parameters for seismic hazard assessment: examples of Bulgaria, *Proc.10th ECEEAug.*28-Sept.2, Vienna, Austria.
- 36. Trifunac, M., Todorovska, M. (1997), Northridge California, earthquake 1994:density of pipe breaks and surface strains. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 16 p.193-207.

Нормативни документи

- 37. Норми за проектиране на сгради и съоръжения в сеизмични райони, София, 1987 г.
- 38. Наредба № 2 от 23.07.2007 г. за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони, Държавен вестник бр: 74.
- 39. EUROCODE 8 Basis of Design and Actions on Structures, CEN 1994.

Международни проекти

40. UNESCO – IUGS – IGCP Project 414: Realistic Modeling of Seismic Input for Megacities and Large Urban Areas, http://users.ictp.it/www_users/sand/unesco-414.html

- 41. RISK-EU project: An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Application to Different European Towns, http://www.risk-ue.net/update1/PPAboutus.htm
- 42. EVK2-CT-2000-57002: Estimates of ground motion and hazard assessment through earthquake scenarios, http://cordis.europa.eu/data/PROJ_EESD/ACTIONeqDndSESSIONeq15675200595ndDOCeq93ndTBLeqEN_PROJ.ht m