

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО ГЕОФИЗИКА, ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОГРАФИЯ

София 1113, ул. "Акад. Г.Бончев" бл. 3, тел: (02)9793322, Факс: (02)9713005 www.niggg.bas.bg

ДЕПАРТАМЕНТ СЕИЗМИЧНО ИНЖЕНЕРСТВО

инж. Гергана Върбанова Колева gvkoleva@gmail.com

Хибриден метод за определяне на сеизмични характеристики за целите на сеизмичното инженерство

Научна специалност 01.04.05 Приложна геофизика

ДИСЕРТАЦИОНЕН ТРУД За получаване на образователна и научна степен ДОКТОР

> Научен ръководител: ст.н.с. д-р инж. Иванка Здравкова Паскалева

> > София 2012 г.

Дисертационния труд съдържа 106 страници. Състои се от 6 глави. Включва 96 фигури, 25 таблици, общи изводи, научни и научно приложни приноси и приложения (списък фигури, научни публикации свързани с дисертационния труд, презентации на дисертационния труд на научни форуми, други публикации, кратък терминологичен речник, литература. Литературата се състои от 104 заглавия.

Изследванията и работата по дисертационния труд са извършени в ЦЛСМСИ, БАН, София, България (Департамент Сеизмично Инженерство, НИГГГ, БАН) и ДНЗ, ИЦТФ, Триест, Италия.

I.1. Въведение	5
I.2. Модално сумиране	5
I.3. Метод на крайните разлики	6
I.4. Хибриден метод	7
I.5.Сеизмично земно движение в големи градски райони	7
II.1. Сеизмични вълни	9
II.1.1 Уравнения на движения и основни зависимости	9
II.1.2 Уравнения на сеизмичните вълни във вертикална хетерогенна среда	.10
II.1.2.1 Вълнови форми на Лав	.13
II.1.2.2 Вълнови форми на Рейли	.15
II.1.2.3 Синтетични вълни в надлъжно хомогенна среда – точков източник.	.15
II.1.2.4 Синтетични вълни в надлъжно хомогенна среда – площен източник	:17
II.2. Хибриден метод-модално сумиране и метод на крайните разлики	.18
II.2.1 Метод на крайните разлики	.18
II.2.2 Хибриден метод	.18
III.1.Регионален структурен модел	.20
III.2. Сеизмични сценарии използвани при симулациите	.20
III.3. Профили за детайлно моделиране на земното движение за примера на гр) .
София	.22
IV.1 1D	.24
IV.1.1 Параметрични тестове с механизъм 1(Табл. 2)	.24
IV.1.2 Параметрични тестове с механизъм 2 (Табл. 2)	.24
IV.1.3 Параметрични тестове с механизъм 3 (Табл. 2)	.24
IV.2 2D	.24
IV.2.1 Спектрално усилване за модели: Сф1, Сф2, Сф3, Сф1р, Сф2р, Сф3р.	.24
IV.2.2 Синтетични акселерограми за модели: Сф1, Сф2, Сф3, Сф1р, Сф2р,	
Сф3р	.24
IV.3 Алгоритъм ПУЛСИН – PULse based wideband SYNthesis	.25
V.1. Основни характеристики и местоположение на профил София 4	.27
V.1.1 Главни характеристики и местоположение на новия профил София 4	27
V.1.1.1 Координати на най-важните точки за построяването на новия	_
профил-Сф4	.27
V.1.1.2 Главни характеристики на 2D модела	.27
V.1.1.3 Сеизмичен сценарии използван при 2D изчисленията	.28
V.2. Реален запис	.28
V.3. Вариации на симулациите при валидационния процес	.29
VI.1 Клъстерен анализ на синтетични данни за целите на сеизмичното	
микрорайониране	.30
VI.2. Изчисляване и разпределение на динамичен фактор на територията на	
град София	.31
VI.2.1 Конструктивен модел на масивна сграда използван при	
изчисленията	.31
VI.2.2 Резултати от проведения анализ	.31
VI.2.3 Изчисляване и разпределение на динамичен фактор на територията	
на град София	31
V1.3. Изчисляване на структурната уязвимост на сграден фонд на примера на	
град София	(11)
VL3.1 Конструктивен молел на масивната сграла използвана при	.52
fine i conception and an an another an experimentation of the second s	. 52
изчисленията	.32

VI.3.2.1 Влияние на геоложките условия върху поведението на	
конструкцията	33
VI.3.2.2 Влияние на сеизмичния механизъм върху усилването	35
VI.3.2.3 Извод	35
Научни и научно-приложни приноси	36
Научни публикации свързани с дисертационния труд	36
Презентации на дисертационния труд на научни форуми	37
Участия в научни проекти	37
Други публикации	37

Глава I Литературен обзор

I.1. Въведение

Сеизмичното микрорайониране е процес на обособяване на зони в сеизмични райони спрямо геоложки и геофизични характеристики на терена (земно движение, податливост на втечняване, свлачища и опасност от скални пропадания, наводнения в следствие на земетресения), с цел коректното определяне на сеизмичния хазард за различни местоположения. Микрорайонирането осигурява основата за теренно специфичен рисков анализ, който може да спомогне за ограничаване на вредите от земетресенията. В обобщен вариант, сеизмичното микрорайониране е процес на изчисляване реагирането на почвените слоеве вследствие сеизмично въздействие и по този начин изменението на сеизмичните характеристики на земната повърхност. Локалната геология оказва голямо влияние върху характеристиките на земното движение, затова, реагирането на терена, в следствие земното движение, в различни точки на града е различно. Следователно картата на сеизмичното микрорайониране на дадена държава може да не е приложима за детайлно изчисляване на сеизмичния хазард за различни градове. Това налага разработването на карти за сеизмичното микрорайониране за големи градове за детайлен анализ на сеизмичния хазард. Карти с микросеизмично райониране могат да послужат, като основа за изчисляване на специфичен теренен рисков анализ, който е важен за отговорни конструкции, като атомни централи, метро, мостове, надлези и др. Сеизмичното микрорайониране, може да бъде разглеждано, като подготвителна фаза при ограничаване на сеизмичния риск.

За целите на сеизмичното микрорайониране, в тази работа са генерирани синтетични сеизмограми, посредством хибриден метод. (виж Panza, 1985; Panza and Suhadolc, 1987; Vaccari et al., 1989; F. Vaccari, S. Gregersen, M. Furlan and G.F. Panza, Synthetic seismograms in Laterally heterogeneous anelastic media by modal summation of P–SV waves; Vaccari et al., 1989; Florsch et al., 1991; Fah et al., 1993; Fah et al., 1994; Romanelli et al., 1996 and Panza et al., 2000). За международното утвърждаване на хибридния метод в рамките на проекта UNESCO–IUGS–IGCP, виж Panza et al. (2002). При този метод, първо синтетичните сигнали са изчислени за модалното сумиране надлъжно модела на основната скала (1D), който е дефиниран чрез хоризонтални слоеве, всеки от който е представен чрез неговата дебелина, плътност, скорости на напречните и надлъжните вълни, и Q-фактор. След това тези сигнали се пропускат през локална структура по схема на крайните разлики (2D).

Направена е валидация на генерираните сигнали с реални данни. Направено е практическо приложение на синтетичните данни за целите на сеизмичното инженерство: 1) клъстерен анализ на синтетични данни; 2) изчисляване и разпределение на динамичен фактор на територията на град София; 3) изчисляване на структурната уязвимост на сграден фонд на примера на град София;

I.2. Модално сумиране

Модално сумиране е метод за симулация на разпространението на сеизмични вълни в основната скала. Модела на основната скала или структурния модел е съставен от хомогенни слоеве, както е показано на Фигура 2. Разграничават се два независими проблема при решение на уравнението за разпространение на вълните в хомогенна, изотропна, еластична среда: 1)разпространение на SH вълни, и 2)разпространение на P-SV вълните. Необходимо е определянето на фазова скорост, премествания и напрежения в дълбочина. Thomson (1950), пръв прилага метод за решение на задача за равнинен, слоест модел. В последствие метода е доразвит от Haskell (1953) и Knopoff (1964).

Алгоритъм създаден от (Panza, 1985) и Panza и Suhadolc (1987) първоначално за разпространение на P-SV вълни, в последствие доразвит и за SH вълните. Покъсно е доразработен от Florsch et al. (1991). Точността не се занижава при симулациите на SH вълните. Характеристиките на P-SV и SH са почти еквивалентни, но по-опростени при SH вълните.

За отчитане нееластичността при симулациите се прави апроксимация от първи ред. Това става на база на методите разработени от Takeuchi и Saito, (1972); Schwab и Knopoff, (1972), както и на изводите на Futterman (1962) за обемни скорости в линейно нееластична среда. Този подход ни позволява да отчетем нееластичността посредством относително малките стойности на Q фактора.

Понятието сеизмичен източник е въведено посредством формулировката на Ben-Menahemand Harkrider (1964). В тази формулировка, е направена апроксимация на цилиндричните функции на Hankel. Тогава симулациите на синтетичните сеизмограми са точни до тогава, докато разстоянието от източника е по-голямо отколкото дължината на вълната (Panza et al., 1973). Сеизмограмите генерирани по този начин съдържат всички обемни вълни, чиито фазови скорости са по-малки отколкото скоростта на S вълната в полупространството ограничаващо структурния модел.

I.3. Метод на крайните разлики

Метод на крайните разлики е една от техниките за симулация на разпространение на вълни в дву- и тридименсионална среда (Alterman and Karal, 1968; Boore, 1972; Kelly et al.; 1976; Aki and Richards, 1980). Диференциалните уравнения са заменени с рекурсивни или ясно формулирани уравнения на крайните разлики. Пространството е дискретизирано чрез регулярна мрежа. При решаване на производните в диференциалните уравнения може да се използват два метода. Първият е така наречения Фурие или псевдоспектрален метод, въведен от Gazdag (1981) и от Kosloffand Baysal (1982). За всяка времева стъпка, се изискват две трансформации по Фурие по мрежата на крайните разлики. За да бъде коректно моделирането, трябва да има само няколко точки (четири или пет) от мрежата по дължината на вълната; това позволява тридименсионално моделиране на разпространение на вълните (Johnson, 1984); Reshefet al., 1988a; 1988b). Втората техника, при решаване на производни е апроксимация с крайни разлики е.g. Altermanand Loewenthal, 1970; Boore, 1972; Korn and Stöckl, 1982; Virieux, 1986). При нея трябва да има десет или повече точки по дължината на вълната (е.g. Alford et al., 1974). Това ограничава максималния размер на структурния модел, но позволява моделирането на сложни модели и модели с рязко променящи се скорости. При дискретизацията трябва да се обърне внимание на два основни момента: 1) полагането по време и пространство, което може да се избегне чрез "low-pass" филтриране за произволни вълни; 2) зависимостта на точността на метода на крайните разлики от интервала на дискретизация на сеизмичните вълни по време и пространство. Така, точността, зависи от броя точки по дължината на вълната. Точността може да бъде завишена чрез по-финна пространствена мрежа или от преминаването от по-финна мрежа на крайните разлики към схема от повисок ред (e.g. Bayliss et al., 1986; Levander, 1985; 1988).

Най-голямото предимство на метод на крайните разлики е, че скоростта може да бъде променлива на разстояния равни на дължината на вълната. Друго предимство на метода е лесното програмиране. Много проблеми може да бъдат

решени с минимален брой итерации. Това е начин да се видят различните видове вълни генерирани от хетерогенностите на структурата. Недостатъци на метода са скоростта и необходимата памет за изчисленията, както и необходимото процесорно време. Ограничената компютърна памет налага въвеждането на изкуствени граници ограничаващи мрежата на крайните разлики в пространството.

I.4. Хибриден метод

Хибридния метод комбинира модалното сумиране и метод на крайните разлики и може да бъде използвано при изучаването на разпространение на вълните в седиментния басейн. Всяка от двете техники е приложена в тази част, където работи най-ефективно: метод на крайните разлики при структурния модел и модалното сумиране при симулация разпространение на вълните от източника до седиментния басейн. В сравнение с другите изчислителни методи, предимствата на хибридния метод, е че се отчита влиянието на източника, пътя и локалните теренни ефекти. Хибридният метод ни позволява да изчислим вълните от сеизмичния източник, едновременно при малки (няколко километра) и големи (няколко хиляди километра) епицентрални разстояния. Хибридния метод комбинира предимствата на методите: модално сумиране и метод на крайните разлики. Употребата на метод на модалното сумиране ни позволява употребата на разгънат източник, което може да бъде моделирано посредством сума от точкови източници, равномерно разпределени в пространството. Това позволява симулацията на реалистичен разломен процес. Пътят от източника до седиментния басейн, може да бъде представена посредством среда съставена от плоски, хомогенни слоеве. Модалното сумиране, позволява третиране на много слоеве, като се взимат под внимание зони с ниски скорости, както и малки летайли на земната кора. Метод на крайните разлики, третираш разпространението на вълните в седиментния басейн, позволява моделирането на разпространение на вълните в многослоеста и бързопроменяща се структура, характерно за седиментния басейн. Обединяването на двата метода се извършва посредством въвеждането на времеви променливи. При SH изчисленията преместванията са използвани, като вход при изчисленията с метода на крайните разлики, докато случая на P-SV, входът да съдържа времеви редове на скоростта.

І.5. Сеизмично земно движение в големи градски райони

Познания за структурата на почвите и вероятностен механизъм на източника е използван при изследването на локалните геоложки ефекти в големи мегаполиси, като Алжир, Александрия, Пекин, Букурещ, Кайро, Делхи, Неапол, Сантяго Де Куба, София, Тесалоники и Загреб.

Сеизмичното микрорайониране, от Alvarez et al. в статията: "Seismic microzoning of Santiago de Cuba: An approach by SH waves modeling", е направено посредством синтетични SH сеизмограми, изчислени по четири профила в региона на града. Моделирането е направено посредством хибриден метод. Преоценка на сеизмичния потенциал на геоложките структури за терена на Алжир и неговите покрайнини е направено от Harbi et al. в "Seismicity and tectonic Structures in the Site of Algiers and its Surroundings: A step towards Microzonation". Направена е компилация от всички сеизмични каталози за всички регистрирани събития, отразени в наличната документация, както и на тектонските условия на обследвания регион. Обобщени са наличните решения на фокални механизми, по съвременни земетресения в региона.

Статията на El Alami et al. "Seismicity of Morocco for the period of 1987-1994", анализира сеизмичността на Мароко според северната сеизмична мрежа на

Мароко (NMSNET). В статията: "Using active faults and seismicity for the strong motion modeling in the eastern rift", El Alami et al., според сеизмични база данни и морски сеизмични профили, прави вероятностния анализ на хазард за регион в северно Мароко. Използван е закон на затихването при построяването на контурна карта на максималното земно ускорение при конкретни период на възвращаемост и експлоатационна годност на конструкциите. В статията на Parvez et al. "Microzonation and site specific ground motion modeling for Delhi city", микросеизмично райониране е направено посредством 2D моделиране на SH и P-SV вълните чрез хибриден метод. Генерирани са реалистични сеизмограми надлъжно на два геоложки профила. Използвани са два сеизмични източника.

Основно задача в статията на El Sayed и др. "Seismicity and seismic hazard in Alexandria and its surroundings" е пресъздаването на земетресението от 28 Май 1998, възникнало недалеч от Александрия. С цел ограничаване последиците на сеизмичния хазард в Александрия, чрез детерминистичен подход са съставени различни сценарии. Изчислени са параметрите на земното движение и съответните честоти на пиковете им при различни фокални механизми. В статиите: "The Nile valley of Egypt: A major active graben that magnifies seismic waves" и "Seismicity and seismic hazard in Alexandria and its surroundings" е направеното обследване на най-уязвимата област по река Нил – долината Кайро-Файоум. Резултатите показват, че ронливите, меки, алувиални седименти в канъона на Нил са основен фактор за вероятни разрушения, поради способността им да усилват земното движение.

В статията на Herak et al. "Amplification of horizontal strong ground motion in Zagreb for realistic earthquake scenarios" се разглежда усилването на хоризонталното земно движение по профил с комплексна геоложка структура, в резултат на за реалистичен сеизмичен сценарии Основен извод подробно обоснован в статията, е че за силно хетерогенни структури, локалните ефекти трябва да бъдат определени за всеки източник, отчитайки всички промени колкото се може по-точно. В статията на Nunziata, "Seismic ground motion in Napoli for the 1980 Irpinia earthquake" чрез хибриден подход са направени сеизмично-стратиграфските напречни сечения. Синтетичните сеизмограми са валидирани чрез реални записи от земетресението Ирпиния (1980). Отчитайки наличната информация за стратиграфските профили и скоростта на срязващата вълна, са обособени шест сеизмо-стратиграфски зони на Неапол. От изчислените реалистични сеизмограми на P-SV и SH вълните, може да се заключи, че пирокласната почва увеличава амплитудата на сигнала. Статията на Nunziata et.al. "Seismic characterization of Neapolitan soils" е фокусирана върху замервания на скоростта на срязващата вълна в Неапол. Направени са детайлни профили на скоростите на сеизмичните вълни в дълбочина и характерни литостратиграфии чрез методите FTAN и Hedghegog.

Направено е картиране на сеизмично земно движение в Букурещ, в следствие на земетресение с източник Вранча, в статията на Cioflan et.al. "Deterministic approach for the seismic microzonation of Bucharest." За валидиране на резултатите, са използвани три записа от силни земетресения (M>6), направени в станция Магуреле. Използван е хибриден метод при относително опростени регионален и локални структурни модели. Направена е нова карта на сеизмичното микрорайониране за Букурещ. Целта в статията на Moldoveano et al. "Microzonation of Bucharest: State of the art" е да се направи обзор на темата за микрорайонирането на Букурещ. Статистиката базираща се на реални записи, показва че в региона на Вранча, на всеки 100 години се случват средно по три деструктивни земетресения (M=7).

В две части е направено сеизмичното микрорайониране на Тесалоники в Triantafyllidis et al. "Part 1: Theoretical site response estimation for microzoning

ригрозез", където се прави теоритично изчисляване на реагирането на терена по седем профила, използвайки хибриден метод. Разглежданите случаи потвърждават, че геометрията и дебелината на скалната основа, са в основата на феномена земно усилване (ground amplification). В статията: "Part II: Comparison of theoretical and experimental site effects" достоверността на теоритично изчисленото реагиране на земята е тествано с реални данни. Сравнението валидира синтетичното моделиране и демонстрира, че при комплексна геометрия, се прилага двумерна числена симулация, за достоверно отчитане на локалните геоложки ефекти.

Реалистично моделиране на сеизмичното земно движение и изчисляване на локалните геоложки ефекти за град Пекин е направено от Ding et al. в статията "Realistic modeling of seismic wave ground motion in Beijing City", както и в "Estimation of the effects in Beijing City." В първата статия е използван хибриден метод за синтезиране на синтетични акселерограми. Сигналите са валидирани с няколко налични реални записи (1998, Zhangbei), както и с разпределението на наблюдавана макросеизмична интензивност (1976, Tangshan). Във втората статия е създадена базаданни за триизмерна геофизична структура, за моделиране на земното движение от двете земетресения. Резултатите показват, че дебелата покривка тертерни и кватернерни седименти силно завишава сеизмичното земно движение. Следователно, тази покривка е важен фактор по отношение на локалните геоложки ефекти. Дефинирани са четири зони на база разлика в дебелината на кватернерните седименти. За всяка зона е изчислен спектър на реагиране.

Град София е изложен на силен сеизмичен риск. Статията на Paskaleva et.al. "Expert assessment of the displacement provoked by seismic events: Case study for the Sofia metropolitan area" комбинира наличната тектонска и геоложка информация за да характеризира и изчисли преместванията. Поради липсата на реални записи за примера на гр. София в изследването на Славов и др. "Deterministic earthquake scenarios for the city of Sofia" се генерират реалистични синтетични сигнали, за няколко сеизмични сценария и пресичащи града геоложки профила.

Глава II Методология

II.1. Сеизмични вълни

II.1.1 Уравнения на движения и основни зависимости

Отчитайки равновесието на силите в т.ч. инерция, вътрешни и външни сили, действащи върху кубичен елемент от континуума и прилагайки закона на Нютон, ние получаваме система от уравнения за движение (1.1).

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \rho X + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z}$$
$$\rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \rho Y + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \quad (1.1)$$
$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \rho Z + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}$$

Където е възприета Картезианска координатна система (*x*, *y*, *z*).

 $\sigma_{ij}(x,t)$ (*i=x, y, z; j=x, y, z*) е тензор на напреженията от втори ред, ρ е плътност

на материала, а X, Y, Z са компонентите на вътрешните сили за единица маса. Ако приемем, че деформациите, означени посредством тензора от втори ред $e_{kl}=(x,t)$ (k=x, y, z; l=x, y, z), са незначителни, те могат да се изразят, като функция на преместванията.

$$e_{xx} + e_{yy} + e_{zz} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

$$e_{xy} = e_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad e_{yz} = e_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \quad (1.2)$$

$$e_{xz} = e_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)$$

Връзката между напрежения и деформации има усложнен вид, ако се отчита налягане, температура и голямото разнообразие на напрежнения. Възприемаме, че твърдите тела имат линейно поведение и достигаме до закона на Хук, (1.3)

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} e_{kl} \quad (1.3)$$

Където C_{ijkl} е симетричен тензор на еластичните модули на разглежданата среда от четвърти ред. Състои се от 81 члена. Ако средата е изотропна, какъвто е найобщия случай на Земята, компонентите на тензора C_{ijkl} възприемат същите стойности по всички оси или $C_{ijkl} = C_{jilk} = C_{jilk} = C_{jikl}$.

Ако въведем променливата на Kronecker δ_{ij} в ур-ние (1.3) получаваме:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} e_{kk} + \mu (e_{ij} + e_{ji}) + \nu (e_{ij} - e_{ji}) \quad (1.4)$$

,където λ , μ и v са скаларни величини (Jeffreys and Jeffreys, 1950). Тъй като e_{ij} е симетричен тензор, ур-ние (1.4) може да се представи във вида

$$\sigma_{ij} = \lambda e_{kk} \delta_{ij} + 2\mu e_{ij} \tag{1.5}$$

където λ и μ се наричат параметри на Ламе.

От уравнения (1.1), (1.3) и (1.5) съставяме линейна система от три диференциални уравнения с три неизвестни. На този етап не е възможно да бъде намерено аналитично решение на системата, следователно системата трябва да се апроксимира. Възникват две възможности за решение. В първия случай са дадени конкретни стойности на средата и се прилага метода на директното числено интегриране при решаване на система диференциални уравнения. При втория случай се прилагат конкретни аналитични методи за решаването на вече опроксимирания модел на средата. (Panza et al., 2001).

II.1.2 Уравнения на сеизмичните вълни във вертикална хетерогенна среда

Ако дефинираме Картезианска координатна система за полупространството, насочвайки позитивната посока на вертикалната ос z към центъра на земята и

свободната повърхност, където вертикални напрежения ($\sigma_{xz}, \sigma_{yz}, \sigma_{zz} = 0$) са равни на нула при равнина z=0, Фиг. 1.



Фиг. 1. Възприета координатна система за вертикалната хетерогенно полупространство (Panza et al., 2001)

Приемаме, че λ , μ и ρ са линейно-непрекъснати функции (piecewise continuous function) на променливата z, така че за скоростите на обемните вълни да имаме следните изрази $\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ и $\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ Ако означим с α_H и β_H максималните стойности на скоростите на обемните вълни при z>H, които остават константни дори и с нарастване на дълбочината, при субституция в y-ния (1.3) и (1.5)

получаваме ур-ние (1.6)

$$\rho \frac{\partial^{2} U_{x}}{\partial t^{2}} = \rho X + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^{2} U_{x}}{\partial x^{2}} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^{2} U_{y}}{\partial x \partial y} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^{2} U_{z}}{\partial x \partial z} + + \mu \frac{\partial^{2} U_{x}}{\partial y^{2}} + \mu \frac{\partial^{2} U_{x}}{\partial z^{2}} + \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{dU_{x}}{\partial z} + \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial U_{z}}{\partial x} \rho \frac{\partial^{2} U_{y}}{\partial t^{2}} = \rho Y + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^{2} U_{y}}{\partial y^{2}} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^{2} U_{x}}{\partial x \partial y} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^{2} U_{z}}{\partial x \partial z} + + \mu \frac{\partial^{2} U_{y}}{\partial x^{2}} + \mu \frac{\partial^{2} U_{y}}{\partial z^{2}} + \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial U_{y}}{\partial z} + \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial U_{z}}{\partial y} \rho \frac{\partial^{2} U_{z}}{\partial t^{2}} = \rho Z + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^{2} U_{z}}{\partial z^{2}} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^{2} U_{x}}{\partial x \partial z} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^{2} U_{y}}{\partial y \partial z} + + \mu \frac{\partial^{2} U_{z}}{\partial x^{2}} + \mu \frac{\partial^{2} U_{z}}{\partial y^{2}} + \frac{\partial \lambda}{\partial z} \left(\frac{\partial U_{x}}{\partial x} + \frac{\partial U_{y}}{\partial y} \frac{\partial U_{z}}{\partial z} \right) + 2 \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial U_{z}}{\partial Z}$$

$$(1.6)$$

Граничните условия, които трябва да бъдат удовлетворени при решаването на урние (1.6) са при z = 0. Удовлетворяване на с-ма (1.6).

И условия за непрекъснатост на преместванията u_x, u_y, u_z , и на напреженията по оста z: $\sigma_{zx}, \sigma_{zy}, \sigma_{zz}$, включително и в точките, в които λ, μ, ρ са прекъснати.

Пълното решение на система ур-ния (1.6) може да бъде представена в интегрален вид. При големи отстояния от източника, отнесени към дължината на вълната,

решението трябва да се търси във формите на вълните Рейли и Лав, (see e.g., Levshin (1973) and Aki and Richards (1980).

Пренебрегвайки обемните сили, решението на системата придобива вида на хармонична плоска вълна, рапространяваща се в положителната посока на х

$$u(x,t) = F(z)e^{i(\omega t - kx)} \quad (1.8)$$

, където к е номера на формите на вълните, отнесено към фазовата скорост *c*, т.е. $\kappa = \omega/c$ и ω е ъгловата честота, (Panza et al., 2001).

Ако разгледаме случая когато $c < \beta_{H}$, ур-ние (1.8) придобива вида:

$$\omega^{2}\rho F_{x} - k^{2} \left(\lambda + 2\mu\right) F_{x} - ik \left(\lambda + \mu\right) \frac{\partial F_{z}}{\partial z} - ik \frac{\partial \mu}{\partial z} F_{z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial F_{z}}{\partial z}\right) = 0$$

$$\omega^{2}\rho F_{y} - k^{2}\mu F_{y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial F_{y}}{\partial z}\right) = 0$$

$$\omega^{2}\rho F_{z} - k^{2}\mu F_{z} - ik \left(\lambda + \mu\right) \frac{\partial F_{x}}{\partial z} - ik \frac{\partial \lambda}{\partial z} F_{x} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\lambda + 2\mu\right) \frac{\partial F_{z}}{\partial z}\right] = 0$$
(1.9)

Два независима проблема относно собствените стойности трябва да бъдат решени за трите компонента на вектора $F = (F_x, F_y, F_z)$. Първият описва движението в равнината (*x*,*z*) т.е. движението на P-SV вълните, а именно:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial F_x}{\partial z} - ik\mu F_z \right] - ik\lambda \frac{\partial F_z}{\partial z} + F_x \left[\omega^2 \rho - k^2 \left(\lambda + 2\mu \right) \right] = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\lambda + 2\mu \right) \frac{\partial F_z}{\partial z} - ik\lambda F_x \right] - ik\mu \frac{\partial F_x}{\partial z} + F_z \left(\omega^2 \rho - k^2 \mu \right) = 0$$
(1.10)

При следните гранични условия при z=0

$$\sigma_{zz} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial F_z}{\partial z} - ik\lambda F_x = 0$$

(1.11)
$$\sigma_{zx} = \mu \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - ikF_z \right) = 0$$

Вторият проблем описва случая, когато имаме движение ограничено от ос у и определя фазовата скорост и амплитуда на SH вълните и има следния вид.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial F_{y}}{\partial z} \right) + F_{y} \left(\omega^{2} \rho - k^{2} \mu \right) = 0 \quad (1.12)$$

Трябва да бъде решено за z=0 и при следните гранични условия:

$$\sigma_{zy} = \mu \frac{\partial F_y}{\partial z} = 0 \quad (1.13)$$

За да достигнем до решение, трябва да направим допълнителна апроксимация. Следвайки Panza et al., 2001, вертикалната хетерогенност в полупространтвото е моделирана посредством група от N-1 на брой, хомогенни, хоризонтални слоеве, които са успоредни на повърхността и се разпростират по цялата равнина на полупространството, Фиг. 2.



Фиг. 2 Модел на хоризонталните слоеве

Нека α_m, β_m са скорости съответно на Р и S вълната, ρ_m - плътност на слоя, d_m – дебелина на m-тия слой от N на брой слоеве, то следва

$$\alpha_{m} = \sqrt{\frac{\lambda_{m} + 2\mu_{m}}{\rho_{m}}} \quad \beta_{m} = \sqrt{\frac{\mu_{m}}{\rho_{m}}} \quad m = 1, 2, ..., N \quad (1.14)$$

$$r_{\alpha m} = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{c}{\alpha_{m}}\right)^{2} - 1} & a \kappa o \ c > \alpha_{m} \\ -i \sqrt{1 - \left(\frac{c}{\alpha_{m}}\right)^{2}} & a \kappa o \ c < \alpha_{m} \end{cases} \quad r_{\beta m} = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{c}{\beta_{m}}\right)^{2} - 1} & a \kappa o \ c > \beta_{m} \\ -i \sqrt{1 - \left(\frac{c}{\beta_{m}}\right)^{2}} & a \kappa o \ c < \beta_{m} \end{cases} \quad (1.15)$$

II.1.2.1 Вълнови форми на Лав

За вълновите форми на Лав, решението на еластичното уравнение на движение за тия слой е

$$u_{x} = u_{z} = 0$$

$$u_{y} = \left(v'_{m}e^{-ikr_{\beta m}z} + v''_{m}e^{+ikr_{\beta m}z}\right)e^{i(\omega t - kx)} \quad (1.16)$$

$$\sigma_{zy} = \mu \frac{\partial u_{y}}{\partial z} = ik\mu r_{\beta m} \left(-v'_{m}e^{-ikr_{\beta m}z} + v''_{m}e^{+ikr_{\beta m}z}\right)e^{i(\omega t - kx)} \quad (1.17)$$

Където v_m и v_m са константи. Според знака, който има, v_m представлява плоска вълна, чиято посока на разпространение сключва ъгъл сот $g^{-1}r_{\beta m}$ с направление

+*z*, когато $r_{\beta m}$ е реално число и се разпространява с направление +*x* с намаляваща експоненциална аплитуда в направление +*z*, когато $r_{\beta m}$ е имагинерно. Аналогично $v_m^{'}$ е плоска вълна чиято посока на разпространение съставя ъгъл соt $g^{-1}r_{\beta m}$ с направление -*z*, когато $r_{\beta m}$ реално число и се разпространява с направление +*x* с нарастваща аплитуда в направление +*z*, когато $r_{\beta m}$ в имагинерна вълна, виж. Фиг. 3, Рапza et al., (2001).

За вълновите форми на Лав (Love modes), граничните условия, които трябва да бъдат удовлетворени за всяка повърхност са непрекъснатост на трансверзалната компонента на преместванията, u_y , и непрекъснатост в тангенциалната компонента на напреженията, σ_{zy} . Тогава ние може да използваме модела на Thomson-Haskell, както и неговите модификации (Schwab and Knopoff, 1972; Florsch et al., 1991) при изчисляването на мултимодалната дисперсия на повърхностните вълни, следователно и на синтетичните сеизмограми в нееластична среда.



Фиг. З Според възприетата координатна система v_m представлява плоска вълна, чиято посока на разпространение сключва ъгъл равен на сос $g^{-1}r_{\beta m}$ в направление +z, когато $r_{\beta m}$ е реално (а) и се разпространява в направление +x, с намаляваща експоненциална аплитуда по направление +z, когато $r_{\beta m}$ в имагинерно (в). Аналогично $v_m^{''}$ е плоска вълна чиято посока на разпространение съставя ъгъл сос $g^{-1}r_{\beta m}$ с направление -z, когато $r_{\beta m}$ реално число (с) и съвпада с направление +x с нарастваща аплитуда в направление +z, когато $r_{\beta m}$ в имагинерна вълна (d). (Фигурата е взета от Рапza et.al., 2001).

II.1.2.2 Вълнови форми на Рейли

За P-SV вълните, периодично решение на еластичното уравнение на движение за тия слой може да се състави от комбинацията на ротационното и дилатериалното решение на вълните.

$$\Delta_{m} = \frac{\partial u_{x}}{\partial z} + \frac{\partial u_{z}}{\partial x} = \left(\Delta_{m}^{'} e^{-ikr_{\alpha m}z} + \Delta_{m}^{''} e^{+ikr_{\alpha m}z}\right) e^{i(\omega t - kx)}$$

$$\delta_{m} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_{x}}{\partial z} + \frac{\partial u_{z}}{\partial x}\right] = \left(\delta_{m}^{'} e^{-ikr_{\beta m}z} + \delta_{m}^{''} e^{+ikr_{\beta m}z}\right) e^{i(\omega t - kx)}$$
(1.18)

Където Δ_m , Δ_m , δ_m , и δ_m са константи Δ_m представлява плоска вълна, чиято посока на разпространение сключва ъгъл сот $g^{-1}r_{\alpha m}$ с +z координата, когато $r_{\alpha m}$ е реално число и съвпада с +x координата и има екпоненциално намаляваща амплитуда в +z направление, когато $r_{\alpha m}$ е имагинерно. Аналогично Δ_m представлява плоска вълна, сключваща същия ъгъл с -z направление, когато $r_{\alpha m}$ е реално и се разпространява в +x направление с нарастваща амплитуда в +z направление, когато $r_{\alpha m}$ е имагинерно. Ставлява плоска вълна, сключваща същия ъгъл с -z направление, когато $r_{\alpha m}$ е реално и се разпространява в +x направление с нарастваща амплитуда в +z направление, когато $r_{\alpha m}$ е имагинерно. (виж 1.18). Същото определение може да се приложи на δ_m , и δ_m заместващи $r_{\alpha m}$ и $r_{\beta m}$. Пренебрегвайки члена $\exp[i(\omega t - kx)]$, премествания и компонентите на напреженията, при дилатация(dilatation) и ротация в ур-ние (1.19), (1.20), може да се дадат във вида

$$u_{x} = \frac{\alpha_{m}^{2}}{\omega^{2}} \left(\frac{\partial \Delta_{m}}{\partial x} \right) - 2 \frac{\beta_{m}^{2}}{\omega^{2}} \left(\frac{\partial \delta_{m}}{\partial z} \right) \quad (1.19)$$

$$u_{z} = -\frac{\alpha_{m}^{2}}{\omega^{2}} \left(\frac{\partial \Delta_{m}}{\partial z} \right) - 2 \frac{\beta_{m}^{2}}{\omega^{2}} \left(\frac{\partial \delta_{m}}{\partial x} \right) \quad (1.20)$$

$$\sigma_{zz} = \rho_{m} \left\{ \alpha_{m}^{2} \Delta_{m} + 2\beta_{m}^{2} \left[\frac{\alpha_{m}^{2}}{\omega^{2}} \left(\frac{\partial^{2} \Delta_{m}}{\partial x^{2}} \right) + 2 \frac{\beta_{m}^{2}}{\omega^{2}} \left(\frac{\partial^{2} \delta_{m}}{\partial z^{2}} \right) \right] \right\} \quad (1.21)$$

$$\sigma_{zx} = 2\beta_{m}^{2}\rho_{m} \left\{ -\frac{\alpha_{m}^{2}}{\omega^{2}} \left(\frac{\partial^{2} \Delta_{m}}{\partial x \partial z} \right) + \frac{\beta_{m}^{2}}{\omega^{2}} \left[\left(\frac{\partial^{2} \delta_{m}}{\partial x^{2}} \right) - \left(\frac{\partial^{2} \delta_{m}}{\partial z^{2}} \right) \right] \right\} \quad (1.22)$$

За формите на сеизмичните вълни Рейли, граничните условия, които трябва да бъдат изпълнени във всяка повърхност са непрекъснатост на преместванията и на напреженията дадени в уравнения: (1.19), (1.20), (1.21), (1.22).

II.1.2.3 Синтетични вълни в надлъжно хомогенна среда – точков източник

Приема се, че сеизмичния източник е моделиран така като равнинен разлом, тъй като преместванията и срязващите напрежения са променливи спрямо разломната повърхнина и обратно, нормалните напрежения са непрекъснати напречно на разломната повърхност. Според Теоремите на Maruyama (1963), Burridge and Knopoff (1964) съществува абсолютна еквивалентност между разломената среда и променливостта на преместванията и срязващите напрежения, както и при неразломената среда, където са приложени конкретни обемни сили. Следвайки реда на действие, предложен от Kausel and Schwab (1973), ние приемаме, че периодите и дължините на вълната, които са обект на нашия интерес, са големи в

сравнение с (rise time) и размерите на източника. Следователно приблизителна функцията на източника, описваща изменчивостта на преместванията напречно на разлома, може да се представи посредством функция (step function) за време и чрез точков източник за пространство. Нещо повече, ако нормалното напрежение не се променя напречно на разлома, според теоремата следва, че еквивалентната обемна сила в неразломената среда, образува дипол с нулев общ момент.Следователно ако приемем, че сме дефинирали собствените стоиности и функции на проблема, може да изразим уравнение на преместването във функция на времето или синтетична сеизмограма за трите компоненти на движение. Трансформация по Фурие (ТФ) на преместването $U = (U_x, U_y, U_z)$ на разстояние *r*

от източника, може да бъде дадено в следния вид: $U = \sum_{m=1}^{\infty} {}^{m}U$, където *m* е индекс

на формата и

$$U_{x}(r,z,\omega) = \frac{e^{-i\frac{3}{4}\pi}}{\sqrt{2\pi}} \left[\chi_{R}(h_{s},\varphi)S(\omega)\frac{\sqrt{k_{R}}e^{-ik_{R}r-\omega rC_{2R}}}{\sqrt{r}}\frac{\varepsilon_{0}u_{x}(z,\omega)}{2c_{R}v_{gR}I_{1R}} \right]_{m}$$
$$U_{y}(r,z,\omega) = \frac{e^{-i\frac{3}{4}\pi}}{\sqrt{2\pi}} \left[\chi_{L}(h_{s},\varphi)S(\omega)\frac{\sqrt{k_{L}}e^{-ik_{L}r-\omega rC_{2L}}}{\sqrt{r}}\frac{u_{y}(z,\omega)}{2c_{L}v_{gL}I_{1L}} \right]_{m}$$
(1.23)
$$U_{z}(r,z,\omega) = {}^{m}U_{x}(r,z,\omega)e^{-i\frac{\pi}{2}}\varepsilon_{0}^{-1}$$

Където *R* и *L* са величини, характерни респективно за Рейли и Лав вълните.

В ур-ние (1.23) $S(\omega) = |S(\omega)| \exp[i \arg(S(\omega))]$ е трансформация на Фурие на времевата функция на източника, докато $\chi(x_s, \varphi)$ представлява азимутна зависимост на фактора на трептенията (Ben-Menhaem and Harkrider, 1964), (Panza et.al.2001).



Фиг. 4 Означения на ъгли при източника, (Panza et. al. 2001)

$$\chi_{R}(h_{s},\varphi) = d_{0} + i(d_{1R}\sin\varphi + d_{2R}\cos\varphi) + d_{3R}\sin 2\varphi + d_{4R}\cos 2\varphi$$

$$\chi_{L}(h_{s},\varphi) = i(d_{1L}\sin\varphi + d_{2L}\cos\varphi) + d_{3L}\sin 2\varphi + d_{4L}\cos 2\varphi$$
(1.24)

Където:

$$d_{0} = \frac{1}{2}B(h_{s})\sin\lambda\sin2\delta$$

$$d_{1R} = -C(h_{s})\sin\lambda\cos2\delta$$

$$d_{2R} = -C(h_{s})\cos\lambda\cos\delta$$

$$d_{3R} = A(h_{s})\cos\lambda\sin\delta$$

$$d_{4R} = -\frac{1}{2}A(h_{s})\sin\lambda\sin2\delta \quad (1.25)$$

$$d_{1L} = G(h_{s})\cos\lambda\sin\delta$$

$$d_{2L} = -G(h_{s})\sin\lambda\cos2\delta$$

$$d_{3L} = \frac{1}{2}V(h_{s})\sin\lambda\sin2\delta$$

$$d_{4L} = V(h_{s})\cos\lambda\sin\delta$$

Където h_s е фокална дълбочина; виж (1.24). В ур-ние (1.25), функцията h_s зависи от величини, означени, като собствени функции на хипоцентъра. В ур-ние (1.26) със звезда * е означено комплексната част на имагинерната величина, т.е. u_x^* , σ_{zz}^* , σ_{zy}^* са реални величини.

$$A(h_{s}) = -\frac{u_{x}^{*}(h_{s})}{u_{z}(0)}$$

$$B(h_{s}) = -\left(3 - 4\frac{\beta^{2}(h_{s})}{\alpha^{2}(h_{s})}\right)\frac{u_{x}^{*}(h_{s})}{u_{z}(0)} - \frac{2}{\rho(h_{s})\alpha^{2}(h_{s})}\frac{\sigma_{zz}^{*}(h_{s})}{u_{z}(0)/c}$$

$$C(h_{s}) = -\frac{1}{\mu(h_{s})}\frac{\sigma_{zx}(h_{s})}{u_{z}(0)/c}$$

$$G(h_{s}) = -\frac{1}{\mu(h_{s})}\frac{\sigma_{zy}^{*}(h_{s})}{u_{z}(0)/c}$$

$$V(h_{s}) = \frac{u_{y}(h_{s})}{u_{y}(0)} = \frac{u_{y}(h_{s})}{u_{y}(0)}$$
(1.26)

II.1.2.4 Синтетични вълни в надлъжно хомогенна среда – площен източник

Гусев (2003) разработва алгоритъм за симулация разпространението на вълни от площен сеизмичен източник, който условно ще наречем ПУЛСИН (PULse-based wideband SYNthesis). При този алгоритъм, сеизмичния източник е представен, като правоъгълна мрежа от точкови подизточници. За всеки един от тях, алгоритъмът генерира фукция по време за големината на сеизмичните моменти, в

резултат на постоянен произволен процес. За да бъде реалистичен, алгоритъмът трябва да съдържа следните характеристики: (1) резултантния (еквивалент на точков източник) спектър на отдалечен източник трябва да апроксимира точно предопределен спектрален скалиращ закон; (2) определени са реалистични дължина и широчина на източника, скорост на разломяване, в резултат на реалистични функции на времето за отдалечен източник; (3) крайното разпределение на преместването върху разломната област, следва двумерен спектрален модел; (4) Възприета е кинематика на разломяване "Haskell-Aki-Heaton" (във всеки конкретен момент, преплъзгащия процес е локализиран в тясна ивица, надлъжно на разлома; (5) стохастичната структура на акселерограмите може да бъде възпроизведена, включваща главната обвивка и пикови фактори. Посредством входящите параметри на алгоритьма ПУЛСИН, може да се получават, различни видове изходни данни: от най-елементарния случай при който единствена променлива е моментовия магнитуд, до много по-усложнени, при който се задават (1) напрежение или размери на разлома, (2) скорост на разломяване и начална точка на разломяване; (3) параметрично отношение на широчина на разломната зона на Heaton към разломната дължина; (4) степен на не Гаусово поведение при статистика на ускорение. Моделът е предназначен за употреба, както при големи отстояния регистрираща станция - разлом, така и при малки разстояния 10-20% от широчината на разлома. Алгоритъма "Пулсин" не е предназначен за употреба при непосредствена близост до разлома. Посредством адекватно избрана функция на Грийн, ПУЛСИН може да бъде използван при определяне на вероятното земно движение и сеизмичен хазарт, включително и за симулация на определено събитие, параметрично изследване, както и при стохастични хазартни изчисления.

II.2. Хибриден метод-модално сумиране и метод на крайните разлики

II.2.1 Метод на крайните разлики

Дефинирано от Taylor, в основата на метода на крайните разлики е, субституция във вълновото уравнение на диференциални оператори с оператори на крайните разлики. Същата субституция се извършва и при началните и граничните условия на уравнението. За нашите цели е достатъчно да ползваме метод на крайните разлики с равномерна стъпка. Така континиума е апроксимиран до правоъгълна равномерна мрежа от точки. Грешката в този случай е пропорционална на стъпката h.

$$u(x \pm h) = u(x) \pm \frac{du}{dx}h + \frac{1}{2}\frac{d^{2}u}{dx^{2}}(h)^{2} \pm o(h^{3}) \quad (1.27)$$

II.2.2 Хибриден метод

Линейната система (1.27) е съставена от три частни диференциални уравнения, с параметри, съставени от променливи, за които не винаги е възможно да се намери аналитично решение. Ние разграничаваме два метода за решаване на системи от вида на система ур-ния (1.27): аналитични и числени методи. Решението, кой от двата метода е по-подходящ зависи от отношението между дължината на вълната и размерите на надлъжните хетерогенности. За да се съчетаят предимствата на двата подхода – аналитичен и числен, се въвежда така наречения хибриден метод, които комбинира предните два метода. През 1993, Fäh et al. разработват хибриден метод, който съчетава метода модално сумиране, приложим при надлъжно хомогенна нееластична среда (Виж глава 1.2) с метода на крайните разлики и оптимизира предимствата на двата метода. Всеки от двата метода е приложен в тази част на структурния модел, където работи найефективно: метод на крайните разлики в частта с надлъжните хетерогеностти на структурния модел, който съдържа седиментния басейн, а модалното сумиране е приложено при симулацията на разпространението на вълните от източника до седиментния басейн. Виж Фиг.5.



Фиг. 5 Схема на хибридния метод (модално сумиране и крайни разлики), Panza et al., (2001)

Глава III База данни

Според Българския сеизмичен код, София попада в зона с очаквана интензивност IX (МШК), което съответства на хоризонтално ускорение 0.27g от еластичния спектър на реагиране. Направено е детайлно моделиране на земното движение за някои сеизмични сценарии, избрани според сеизмотектонския режим на района на град София. С помоща на хибридния метод, (Faeh et al., 1993), са синтезирани синтетични сеизмограми за надлъжно хетерогенната нееластична среда.

В тази работа, използвайки специфични знания по геология и описаните геотехнически свойства в наличния картографски материал за София, са разгледани три профила и няколко сеизмични сценария, при които променливи са механизма на източника и магнитуда. Разгледан е един модел на твърдата скала при моделиране разпространението на вълните от източника до началото на локалните 2D профили. Този модел е използван при изчисляването на референтен сигнал (синтетични сеизмограми в твърдата скала) за да бъдат сравнени с резултатите на детайлното моделиране за определяне на локалния геоложки ефект (site effect) във вид на отношение на спектрите на реагиране (2D/твърда скала).

За да бъдат извлечени, важни параметри от гледна точка на сеизмичното инженерство, са изчислени, трикомпонентните синтетични сеизмограми, велосиграми и акселерограми.

Ш.1.Регионален структурен модел

Анализът на сеизмотектонски условия и структура на седиментната среда на Софийската депресия е използван при изготвянето на структурния модел (до дълбочина 107км, Шанов и др., 1998). За Q факторите на P и S вълните, приемаме стойностите според Dziewonski and Anderson (1981). Използван е един модел на твърдата скала (bedrock model) за град София. В Табл. 1 са дадени неговите основни характеристики.

За същия модел на гр. София, са изчислени спектрите на фазовата и груповата скорост (дисперсни криви, за първите 108 вълнови форми на Рейли), до 10 Нг при стъпка 0.05Нг,

Дебелина на пласта	Плътност	α _m	β_{m}	Qp	Qs	Дълбочина
[км]		[км/сек]	[км/сек]			[км]
0.500	2.30	4.000	2.000	110.00	50.00	0.50
1.600	2.30	4.500	2.400	132.00	60.00	2.10
4.000	2.50	5.850	3.180	330.00	150.00	6.10
9.000	2.55	6.000	3.180	330.00	150.00	15.10
22.000	2.75	6.550	3.466	330.00	150.00	37.10
5.000	3.30	8.000	4.234	1200.00	1000.00	42.10
60.000	3.35	8.100	4.286	120000	1000.00	102.10
5.000	3.35	8.200	4.400	1200.00	1000.00	107.10

Табл. 1 Характеристики на модела на основната скала, използвани при изчисленията

III.2. Сеизмични сценарии използвани при симулациите

Максималната макросеизмична интензивност за София е I=IX (МШК), регистрирана през 1858 (Бончев и др., 1982), може да бъде очаквана отново в следващите 150 години (Христосков и др., 1989), т.е. това може да бъде един от силните сеизмични сценарии. Според карти на сеизмичния хазарт за (Сігсит-

Раппопіап region), Рапza and Vaccari, (2000) и Gorshkov et al., (2000), София попада в регион с потенциал за поява на земетресение с M>6.5, при макросеизмична интензивност I=VIII-X. Интензивността на региона на гр. София се асоциира със сеизмичност възникваща в горните 17-20км от литосферата. Очаквана макросеизмична интензивност I=VIII-IX може да възникне (Главчева, 1990) при земетресение с магнитуд M=7, с епицентър 10-15км югозападно от центъра на града. (Христосков, 1989; Алексиев и др., 1997; Славов, 2000; Матова, 2001; Солаков, 2001). Параметрите на използвания механизъм в тази част, са избрани така, че да симулират земетресението разтърсило София през 1858. Виж. Табл.2, където φ - азимутен ъгъл между разломната линия L или следата й на земната повърхност; δ - ъгъл на наклона (западане) на разломната равнина; λ - ъгъл между вектора на относителното преместване и линията на разлома.

Табл. 2 Механизми на източника, използвани при 1D параметричните тестове

Механизъм	φ	δ	λ	Фокална дълбочина	Епицентрално разстояние
	[°]	[°]	[°]	[км]	[км]
1	135	43	111	10	25
2	21	44	309	2	8
3	340	77	285	8	15

Наименование на теста	Механизъм	Дълбочина на източника	Епицентрално разстояние от източника	Магнитуд
		[км]	[км]	
acc6	1	10	10-20	7
acc7	1	15	10-20	7
acc8	1	20	10-20	7
acc9	1	25	10-20	7
acc10	1	30	10-20	7
acc16	2	10	10-20	7
acc17	2	15	10-20	7
acc18	2	20	10-20	7
acc19	2	25	10-20	7
acc20	2	30	10-20	7
acc26	3	10	10-20	7
acc27	3	15	10-20	7
acc28	3	20	10-20	7
acc29	3	25	10-20	7
acc30	3	30	10-20	7

Табл. З Схема на параметрични тестове направени за 1D изчисленията

Табл. 4 Сеизмичен	і сценарий използвани	при 2D симулациите
-------------------	-----------------------	--------------------

Име на сценария	Геогр. ширина, геогр. дължина, Магнитуд		φ	δ	λ	Фокална дълбочина	Епиц разст до най-близкия профил	
	La	Lo	М					
Sce3	42.79	23.49	7	340	77	285	10	10

III.3. Профили за детайлно моделиране на земното движение за примера на гр. София

Три представителни геоложки профила в град София: "София 1"(Сф1), "София 2"(Сф2) и "София 3"(Сф3), Фиг. 1, заемат място в западния мегаблок и поспециално Люлин (блок от първи ранк), който е пресечен от разломите Северна Витоша, Обеля и Нови Искър. Два профила с направление 3-И (Сф1) и (Сф2) с дължина около 12-14км започват от Обеля и Овча купел и пресичат града. Профил Сф 3, с направление Ю-С, минава от Земляне до Кубратово. Профилите достигат до дълбочина 650м в твърдата скала. Основната скала има плътност от 2500 kg/m³ до 2600 kg/m³. Основните характеристики на надлъжно вариращите 2D модела са взети от Paskaleva et al. (2004).



Фиг. 1 Град София с наложени профили ("София 1" (Сф1), "София 2" (Сф2), "София 3" (Сф3). G. Koleva et al. (2008)

	Слой	Плътн	α	ß	On	Os
WE	Cd 1r	g/cm^3	km/s	km/s	×Р	X
W-E	sed1	1 870	0.900	0.330	30	15
	sed2	1.070	1 580	0.400	30	15
	sed3	1.930	1.580	0.400	30	15
	sed4	1.920	1.500	0.400	30	15
	sed5	1.920	1.650	0.480	30	15
	sed6	1.940	1.000	0.480	50	25
	sedo	1.940	1.000	0.000	50	25
	sed/	1.930	1.000	0.040	50	25
	sedo	2.040	2.000	0.080	50	25
	seu9	2.040	2.000	0.700	50	25
	sed10	2.030	2.100	0.700	50	25
2D Модел "София 1"	sed11	2.100	2.100	0.720	30	25
	sed12	2.560	4.000	1.900	100	50
	Слой	Плътн	$\alpha_{\rm m}$	β_{m}	Qp	Qs
W-E	Сф 2r	g/cm ³	km/s	km/s		
	sed1	1.930	1.700	0.300	30	15
	sed2	1.900	0.650	0.300	30	15
	sed3	1.900	0.850	0.425	30	15
	sed4	1.910	0.750	0.375	30	15
	sed5	1.940	0.900	0.450	30	15
	sed6	1.930	1.720	0.500	50	25
	sed7	1.930	1.650	0.475	50	25
	sed8	1.930	1.675	0.500	50	25
	sed9	1.930	1.800	0.550	50	25
	sed10	1.930	1.900	0.680	50	25
2D Молед "София 2"	sed11	1.940	1.800	0.575	50	25
20 модел софия 2	sed12	2.600	4.000	2.600	100	50
	sed13	2.560	4.100	1.900	100	50
	sed14	2.060	2.000	0.680	50	25
	sed15	2.120	2.050	0.800	50	25
	sed16	2.520	3.800	1.800	100	50
	sed17	2.600	4.200	2.350	100	50
	Слой	Плътн	α	ß	On	Os
WE	Cch 3r	g/cm^3	km/s	km/s	ХP	X ³
W-E	sed1	1.910	0.650	0.300	30	15
	sed2	1.950	1.550	0.390	30	15
	sed3	1.910	1.550	0.350	30	15
	sed4	1.910	1.590	0.420	30	15
	sed5	1,930	1,680	0.450	30	15
	sed6	1 910	1 610	0.450	30	15
	sed7	1.930	1.720	0.500	30	15
	sed8	1 930	1 800	0.550	50	25
	sed0	1 930	1 700	0.480	50	25
	sed10	1 940	1 800	0.590	50	25
	sed11	1.040	1 900	0.570	50	25
2D Молел "София 2"	sed12	1.950	1.200	0.640	50	25
20 тодел софия 5	sed12	2 050	2 000	0.040	100	50
	sed1/	2.050	4 100	1 000	100	50
	sed15	2.300	2 050	0.780	100	50
	sed16	2.120	4 800	2 600	100	50
	scuro	2.000	+.000	2.000	100	50

Табл. 5 Надлъжно варираращ 2D модели по профилите и тяхните основни характеристики Сф1, Сф2, Сф3, (Ivanov 1997, Ivanov et al. 1998)

Глава IV Параметрични изследвания, анализи и резултати

IV.1 1D

Основната цел на параметричния тест е определянето на земното движение в модела на твърдата скала. Най-често, променлив параметър е: механизъм на източника (ϕ , h, M и др.). С помоща на параметричния тест спрямо ϕ , може да се дефинира най-разрушителния сценарии. При изчисленията са използвани три реални механизма (виж Табл. 2).

В резултатите от параметричния тест за дълбочината на източника, се наблюдава ефекта на затихването, както и промяна във формата на вълните.

Основни изводи от представените резултати са:

За тестовете, с промяна на дълбочината на източника, ефекта на затихване е отчетлив, както и максималните стойности на компонентите на вълната, намаляват с дълбочината. Формата на вълните, става по-гладка с увеличаване на дълбочината.

За тестовете с различни механизми на източника, отчитащ влиянието на източника върху разпространението на вълната в хетерогенната среда.

IV.1.1 Параметрични тестове с механизъм 1(Табл. 2)

IV.1.2 Параметрични тестове с механизъм 2 (Табл. 2)

IV.1.3 Параметрични тестове с механизъм 3 (Табл. 2)

IV.2 2D

Разгледани са два модела в зависимост от позицията на източника. Условно ще ги наречем модел "София", когато източника е разположен на запад от София и "София reversed", когато източника е разположен на изток от София. Геоложките профили са означени с: Сф1, Сф2, Сф3, Сф1г, Сф2г, Сф3г, виж Табл. 5.

IV.2.1 Спектрално усилване за модели: Сф1, Сф2, Сф3, Сф1р, Сф2р, Сф3р

IV.2.2 Синтетични акселерограми за модели: Сф1, Сф2, Сф3, Сф1р, Сф2р, Сф3р Табл. 6 Максимални стойности на преместванията, скорости и ускорения, получени от изчисленията

20 modell could in a										
	Трансверзална компонента			Радиа	ллна компо	нента	Вертикална компонента			
	PGA	PGV	PGD	PGA	PGV	PGD	PGA	PGV	PGD	
Сф1	696.	44	6	669	49	8	751	56	8	
Сф2	679	36	4	925	56	7	709	40	5	
Сф3	824	33	5	867	57	7	721	43	5	

2D модел: София reversed, M=7

2D молел: София М=7

	Трансверзална компонента			Радиална компонента			Вертикална компонента			
	PGA	PGV	PGD	PGA	PGV	PGD	PGA	PGV	PGD	
Cф1r	684	43	6	718	48	8	669	58	8	
Сф2r	791	37	5	544	40	6	720	53	7	
C¢3r	674	39	6	523	44	7	779	63	9	

IV.3 Алгоритъм ПУЛСИН – PULse based wideband SYNthesis

При магнитуд М=7 и малко епицентрално разстояние от източника до найблизкия профил (10км), (виж параметри на сценария, използвани при изчисленията, Табл. 4), за да се отчете разломния процес, както и "directivity effect" (зависимостта между посоката на разпространение на вълните от разломния процес и неговия азимут), е използван площен източник. Използван е алгоритъм, за симулация разпространението на вълните от източник с крайни размери - ПУЛСИН (PULse-based wideband SYNthesis).

Генерирани са сеизмични вълни надлъжно на изследваните профили и са получени, акселерограми, велосиграми и сеизмограми за трите компоненти на земното движение: трансверзална (TRA), радиална (RAD) и вертикална (VERT), взимайки предвид трите азимута на регистрираща станция (0°, 90°, 180°) в зависимост посоката на разпространение на разломяването. От синтезираните сигнали са извлечени максималните скорости (PGV), ускорения (PGA) и отношение на спектрите на реагиране на ускоренията (RSR, т.е спектрите на реагиране изчислени от сигналите синтезирани надлъжно на локалните профили и нормализирани от спектрите на реагиране изчислени от съответните сигнали синтезирани за модела на твърдата скала) които имат особено важно значение от гледна точка на сеизмичното инженерство. Локалния геоложки ефект е отчетен чрез отношението на спектрите на реагиране (RSRA). Основен проблем в сеизмичното инженерство е прогнозирането на максималното земно ускорение за конкретен терен при бъдещо земетресение, базирано на информация от предходни събития. В инженерната практика, често се налага изчисляването не само на PGA, но и на спектъра на реагиране, като основна характеристика използвана в проектирането. Употребата на PGV е уместна при анализ на подземни съоръжения, докато PGD при изолация на основата.

Направено е разпределение на максималното земно ускорение (PGA) по протежение на профилите София 1, 2 и 3, съответно за радиална и трансверзална компонента, където максималното земно ускорение е отчетено за модел "София 3", азимут 0°, радиална компонента: $PGA_{max} = 444.0 \text{ cm/sec}^2$. Съответно максималните такива стойности за модел "София 1" е равно 417.0 cm/sec² (RAD компонента и азимут 0°), за модел "София 2" е 364.0 cm/sec² (RAD компонента и азимут 90°).

Максималната изчислена земна скорост (PGV) за радиалната и трансверзалната компонента е за модел "София 1" е 46.4 cm/s за RAD компонента и азимут 0°. Съответно стойностите на PGV за модел "София 2" е равно на 48.2 cm/s (RAD компонента и азимут 0°), докато за модел "София 3" е 42.1 cm/s (RAD компонента, азимут 0°.

Максималното PGA=428.0 cm/s² (азимут 0°) за вертикалната компонента е засечена при модел "София 1" и съответно PGV = 48.4 cm/s (азимут 0°).

Максималните стойности за PGA са засечени в диапазона епицентрално разстояние от 10.4 км до 15.6 км.

Изчислени са максималното разпределение на PGD по профилите на радиалната и трансверзалната компонента. PGD за модел "София 1" е 8.3 ст (RAD компонента, азимут 0°). Съответно стойностите на PGD за модел "София 2" са 8.1 ст (RAD компонента, азимут 0°) и за модел "София 3" 7.0 ст (RAD компонента). Максималните стоиности за PGV са открити в диапазона 10.4 км - 12.2 км. Може да се направи заключение, че диапазона на стойностите за ускорение, скорост и преместване са различни за трите геоложки модела – "София 1, 2 и 3" за трите избраните азимути.

Фокусирайки се върху настоящия анализ, за трите компонента (радиална, трансверзална и вертикална) стойностите на PGA и PGV при азимут 0° относно посоката на разломяване са по-големи от стойностите съответно за азимут 90° и 180°.

Локалния геоложки ефект по изследваните профили е изразен чрез отношение на спектрите на реагиране (RSR) и е от особено значение за сеизмичното инженерство. Това е отношение между амплитудите на спектрите на реагиране за 5% затихване за локалната хетерогенна среда, SA(2D), и съответните стойности разглеждайки структурата на основната скала SA(1D), RSR=SA(2D)/SA(1D). Направено е разпределение на RSR спрямо честота и епицентрално разстояние за всички разглеждани профили и компоненти. Максималните коефициенти на усилване при RSR нарастват от 1. Максималните коефициенти на усилване при RSR нарастват от 1. Максималните коефициенти на усилване при RSR нарастват от 1. Максималните коефициенти на усилване за всяка земна компонента и азимут (0°, 90°, 180°) надлъжно на трите профила ("София 1", "София 2", "София 3"). Максималните усилвания от 7 до 10, са при вертикалната компонента при честотен диапазон 1-5 Hz. Това е терена разположен при епицентрално разстояние 12 и 17км, където коефициента на усилване е между 3 и 5 и за двете компоненти – радиална и трансверзална. Найголямото усилване се появява в началото (епицентрално разстояние 10-13км) и в края на профила (епицентрално разстояние 17-22км).

Табл. 7 Отчетени максимални коефициенти на увеличение за всеки компонент на земното движение при азимут (0°, 90°, 180°) за трите профила ("София 1", "София 2", "София 3")

Профил	Азимут	Комп.	Коеф. на усилване	Чест.	Разст. до източника
	(°)			(Hz)	(км)
		vert	10	1-5	10
	0	rad	3	0-1	12-14,19-22
		tra	3	0-5	10-12
		vert	8	1-5	10-11
София 1	90	rad	3	0-2	10-12,18-22
		tra	3	0-3	10-11
		vert	6	1-5	10-11
	180	rad	4	0-1	10-12,18-22
		tra	3	0-3	10-11,20-22
		vert	8	2-4	10-11
	0	rad	4	0-1	11-13
		tra	4	0-4	20-22
	90	vert	10	1-5	10-11
София 2		rad	4	0-1	11-13,15-17,19-21
		tra	5	0-3	18-22
		vert	10	0-5	10-11
	180	rad	4	0-1	10-22
		tra	5	2-3	19-21
		vert	7	1-5	10-11
	0	rad	3	0-3	10-14,18-22
		tra	4	0-2	20-22
		vert	9	1-5	10-11
София 3	90	rad	4	0-1	12-14,19-21
		tra	4	0-3	13-15,20-22
		vert	10	1-5	10-11
	180	rad	5	0-1	19-22
		tra	4	0-1	14-15

Глава V

Валидация на синтетичните данни с реални записи на примера на град София

V.1. Основни характеристики и местоположение на профил София 4

42.85 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 n n n 0 0 0 0 0 o 0 O 0 0 0 0 42.8 0 0 0 n 0 0 0 0 n n ñ 42.75 n 2 42.7 42.65 *VITOSHA* 2 2 1 2 2 3 2 3 3 3 42.6 23.3 23.35 23.4 23.45 23.5

V.1.1 Главни характеристики и местоположение на новия профил София 4

Фиг. 2 Карта на геоложките условия в гр. София с наложени надлъжни профили – Сф1, Сф2, Сф3, Сф4, където: 3. - твърда скала; 2. - твърда седиментна скала; 1. - средно меки пластове с възраст горен неоген; 0. - меки кватернерни слоеве, Паскалева и др. (2004)

V.1.1.1 Координати на най-важните точки за построяването на новия профил-Сф4

Сеизмологична станция – Редута: La. 42.71, Lo. 23.42 Начална точка на профил София 4 - La. 42.639, Lo. 23.395 Крайна точка на профил София 4 - La. 42.722, Lo. 23.426 Разстояние от сеизмичния източник до началото на профил София 4: 8км Дължина на профила: 10км.

V.1.1.2 Главни характеристики на 2D модела

Плътностите на слоевете и скоростите на $P(\alpha m)$ и $S(\beta m)$ вълните са взети от "insitu" измервания и стандартни лабораторни тестове (Ivanov, 1997; Ivanov et al., 1998).

	Слой	Плътност	αm	βm	Qp	Qs
2 3 2		g/cm ³	км/s	км/s		
4	sed1	1.930	1.675	0.500	50	25
5 5	sed2	1.930	1.800	0.550	50	25
6	sed3	1.700	1.150	0.519	50	25
	sed4	1.800	1.330	0.534	50	25
7	sed5	1.940	1.800	0.600	50	25
	sed6	1.800	1.300	0.650	50	25
δ	sed7	1.900	3.200	0.650	50	25
	sed8	1.950	1.900	0.680	50	25
9	sed9	2.050	2.100	0.700	50	25
10	sed10	2.120	2.050	0.800	50	25
11	sed11	2.600	4.200	2.350	100	50

Фиг. 3 Надлъжен 2D модел в посоки ЗИ и ЮС с главни характеристики на профил Сф4

V.1.1.3 Сеизмичен сценарии използван при 2D изчисленията

Табл.	8	Сеизмичен	сценарии	използван	при 2	2D	изчисленията
-------	---	-----------	----------	-----------	-------	----	--------------

Наименование на сценария	Геогр. координати Магнитуд			φ	δ	λ	Фокална дълбочина	Епицент. разст. до профила
	La Lo M			[°]	[°]	[°]	[км]	[км]
Sce1	42.57	23.37	3.7	21	44	309	2	10

V.2. Реален запис

Земетресението регистрирано на 27 Април 2006 (15:41:30ч. – местно време) е възникнало югоизточно от гр. София с епицентър 42.57N 23.37E. Фокална дълбочина h=2км, предварително изчислен магнитуд M=3.7, интензивност, IV – V MSK. Земетресението е усетено в кварталите "Младост", "Студентски град", "Захарна фабрика", "Овча купел". Няма данни да е усетено в квартал "Павлово". Събитието е записано в централната част на гр. София, при основите на седем етажна панелна сграда с велосиметър GBV-316. Характеристики на записа: запис преди събитието - 2 сек, запис след събитието – 10сек, ниво на тригериране 0,03мм/сек с продължителност 24сек. Посредством инструмента са записани велосиграми, а чрез диференциране и акселерограми. На Фиг. 4 са дадени реалните записи на земната скорост, както диференциране за ускоренията (RSA), скоростите (RSV) и преместванията (RSD), както и честотите на появата им са дадени в Табл. 9.

Input Data	
File: STA11700.GSR Start: 27/4/2006 ä. 15:41:30.320 Length: 23.780 sec (1189 samples at 50 sps)	
Station code: STA Instrument: GBV_316 (03.00.04) S/n: 731 Pre-event: 2 sec Post-event: 10 sec	
Peak: -0.0908 mm/s at 5.94 sec	
E and E and Marked Marked Marked Marked Marked Marked And And And And And And And And And An	· ^ · ~ · ~ · ~ · ~ · · · · · · · · · ·
S F ANALAM A A MANA MANA MANA MANA MANA MAN	
Peak: -0.0909 mm/s at 5.16 sec	
E autor to A t	
	~^~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
So F And And Market A All A A A A A A A A A A A A A A A A	
0 5 10 15 sec	25
Processed Data	
Processed Data File: STA11700.GSR_Data type: Differentiated	8
Processed Data File: STA11700.GSR Data type: Differentiated St 20 Peak: 2.341 mm/s*2 at 4.42 sec	
Processed Data File: STA11700.GSR Data type: Differentiated	
Processed Data File: STA11700.GSR Data type: Differentiated File: STA11700.GSR Data type: Differentiated Feek: 2.341 mm/s*2 at 4.42 sec	
Processed Data File: STA11700.GSR Data type: Differentiated Peak: 2.341 mm/s ² at 4.42 sec	
Processed Data File: STA11700.GSR Data type: Differentiated File: STA11700.GSR Data type: D	۵
Processed Data File: STA11700.GSR Data type: Differentiated File:	i
Processed Data File: STA11700.GSR Data type: Differentiated File: STA11700.GSR Data type:	(
Processed Data File: STA11700.GSR Data type: Differentiated Peak: 2.341 mm/sr2 at 6.22 sec Peak: 2.381 mm/sr2 at 6.22 sec Peak: 2.381 mm/sr2 at 6.22 sec	
Processed Data File: STA11700.GSR Data type: Differentiated File:	
Processed Data File: STA11700.GSR Data type: Differentiated File:	
Processed Data File: STA11700.GSR Data type: Differentiated File:	·····
Processed Data File: STA11700.GSR Data type: Differentiated File: STA11700.dSR Data type: Differentiated Peak: 2.341 mm/s*2 at 4.2 sec File: STA11700.dSR Data type: Differentiated Peak: 2.341 mm/s*2 at 6.22 sec File: Sta11700.dSR Data type: Differentiated Peak: 2.341 mm/s*2 at 6.22 sec File: Sta11700.dSR Data type: Differentiated Peak: 2.341 mm/s*2 at 6.22 sec File: Sta11700.dSR Data type: Differentiated Peak: 2.341 mm/s*2 at 6.22 sec File: Sta11700.dSR Data type: Differentiated Peak: 2.341 mm/s*2 at 6.12 sec File: Sta11700.dSR Data type: Differentiated Peak: 2.341 mm/s*2 at 6.12 sec File: Sta11700.dSR Data type: Differentiated Peak: 2.341 mm/s*2 at 6.10 sec File: Sta11700.dSR Data type: Differentiated Peak: -2.354 mm/s*2 at 6.10 sec File: Sta11700.dSR Data type: Differentiated Peak: -2.354 mm/s*2 at 6.10 sec File: Sta11700.dSR Data type: Differentiated Peak: -2.354 mm/s*2 at 6.10 sec File: Sta11700.dSR Data type: Differentiated Peak: -2.354 mm/s*2 at 6.10 sec File: Sta11700.dSR Data type: Differentiated File: Differentiated	
Processed Data File: STA11700.GSR Data type: Differentiated Peek: 2.341 mm/s*2 at 6.22 sec Peek: 2.381 mm/s*2 at 6.22 sec Peek: 2.381 mm/s*2 at 6.10 sec File: STA11700.GSR Data type: Differentiated Peek: 2.381 mm/s*2 at 6.10 sec File: STA11700.GSR Data type: Differentiated File: STA11700.G	25

Фиг. 4 Записи на земна скорост и диференцирано земно ускорение. Максималните амплитуди максималните земни параметри, като ускорения, скорост и преместване, както и време на поява на максималните стойности са дадени в Табл. 8.

Табл. 9 Максимално земно ускорение, скорост и преместване, спектър на реагиране на ускоренията (RSA), време на поява на RSA_{max}

Компонент	PGA	PGV	PGD	RSA	Време при RSAmax
	$[cm/s^2]$	[cm/s]	[cm]	$[cm/s^2]$	[s]
SZ	0.234	0.009	0.003	1.742	0.22
(вертикално)	при 4.42sec	при 5.94sec	при 9.82sec		
SN	0.238	0.009	0.004	1.682	0.188
(хоризонтално)	при 6.22sec	при 3.66sec	при 11.54sec		
SE	0.235	0.009	0.003	1.489	0.158
(хоризонтално)	при 6.10sec	при 5.16sec	при 8.90sec		

Табл. 10 RSA, RSV и RSD за различни компоненти

Компонент	RSA	RSV	RSD
	$[cm/s^2]$	[cm/s]	[cm]
SZ вертикално	1.742	0.068	0.006
	при 4.5Hz	при 4.5Hz	при 2.5Hz
SN хоризонтално	1.682	0.055	0.006
	при 5.3Hz	при 5.3Hz	при 2.2Hz
SE хоризонтално	1.489	0.058	0.005
	при 6.3Hz	при 3.0Hz	при 3.0Hz

V.3. Вариации на симулациите при валидационния процес

В Табл. 11 в резюме са дадени използваните вариации при валидационния процес.

Табл. 11 Резюме с различни параметри използвани при различните вариации на верификационния процес

Вариант			Механи	ІЗЪМ	C	Струкурен модел - 1D			
	М	φ	δ	λ	Дълб.	αm	βm	Qp	Qs
	[-]	[°]	[°]	[°]	[КМ]	[км/s]	[км/s]	[-]	[-]

Сф4_1	3.7	21	44	309	2	αm,o	βm,o	Qp,o	Qs,o
Сф4_2	- // -	90	- // -	- // -	- // -	- // -	- // -	- // -	- // -
Сф4_3	- // -	- // -	- // -	- // -	- // -	- // -	- // -	Qp,1	Qs,1
Сф4_4	- // -	- // -	- // -	- // -	- // -	αm,1	βm,1	Qp,o	Qs,o
Сф4_5	- // -	- // -	- // -	- // -	- // -	αm,1	βm,1	Qp,1	Qs,1
Сф4_6	- // -	- // -	- // -	- // -	4	- // -	- // -	Qp,o	Qs,o
Сф4_7	3.8	- // -	- // -	- // -	2	- // -	- // -	Qp,o	Qs,o

Където:

ат– скорост на Р вълната в надлъжно вариращата част на 2D модела – надлъжно на профил Сф 4 в посока Запад-Изток и Север-Юг;

βm – скорост на S вълната в надлъжно вариращата част на 2D модела – надлъжно на профил Сф 4 в посока Запад-Изток и Север-Юг;

Qp – Q фактор на P вълната в надлъжно варираща част на 2D модела – надлъжно на профил Сф 4 в посока Запад-Изток и Север-Юг;

Qs – Q фактор на S вълната wave in laterally varying part 2D model – надлъжно на профил Сф 4 в посока Запад-Изток и Север-Юг;

Стойностите на ат,1, βт,1, ат,о, Qs,о Qp,1 Qs,1 са дадени в табл: 12, 13, 19, 26, 33, 40, 47 и 50.

Глава V

Изводи

Анализирайки само максималните стойности на спектрите на реагиране, може да се заключи, че:

1. За сценарий Сф4_1 R= 1,5, SA_{max,real} е 1,5 пъти по-ниско от стойността при синтетичните данни.

2. За вариант Sf4_2 R=SA_{max,real}/SA_{max,Sf4_2} = 4,2.

3. За вариант Сф4_3, отношението между $SA_{max,sf4_3}$ and $SA_{max,real.}$ е същото както при Сф4_2.

4. За вариант Сф4_4 имаме отнош. $R=SA_{max,sf4}/SA_{max,real}=5$

5. За вариант Сф4_5 имаме отнош. R=SA_{max,sf4}/SA_{max,real} =5

6. За вариант Сф4_6 имаме отнош. $R=SA_{max,sf4}/SA_{max,real}=1.8$

Може да заключим, че най-доброто решение е случай Сф4_6, тъй като има найдобро съвпадение между реални и синтетични данни. Колкото стойностите на R са по-малки, толкова по-добро решение имаме.

Глава VI

Практическо приложение на синтетичните данни за целите на сеизмичното инженерство

VI.1 Клъстерен анализ на синтетични данни за целите на сеизмичното микрорайониране

Изследван е проблема на поведението на сеизмичните вълни за района на София при един възможен максимален сценарий на поява на земетресение. Предложен е подход за класификация на сеизмични вълни на базата на трансформации на акселерограми по главните оси. С помощта на трансформацията по главни оси на генерирани акселерограми и сценично ориентиран модел, са определени стойностите на разрушителната фаза на ускоренията за приетия сценарий. За избран диапазон от "преобразувани" акселерограми е приложена равнинна векторна квантизация. Чрез "self-organized map" се определят тегловите центрове на избрани класове. Прилагането на самоорганизираща карта "self-organized map" оптимизира избраната цел и вероятностната плътност на избраните групи ускорения. Предлаганият подход на анализ на акселерограми е подходящ за избор на параметри на устройства за контрол поведението на строителни системи в района на София по време на земетресение.

VI.2. Изчисляване и разпределение на динамичен фактор на територията на град София

VI.2.1 Конструктивен модел на масивна сграда използван при изчисленията

Разглеждания модел (Фиг.10) на пет етажна масивна сграда (H=15м) с главен период T=0.40s. Конструкцията е регулярна в план и по височина (L=22m; B=15m). Моделирането и изчисленията са направени с помоща на програмния продукт SAP2000 при характеристики на материала: бетон B20, модул на еластичност E= $2.75 \times 10^7 \text{kN/m}^2$, коефициент на Поасон: 0.2.

Използван е линеен модален "time history" анализ. Товара е приложен като акселерограма по двете хоризонтални направления. Акселерограмите първо са нормализирани към максималната си стойност и след това към Българския код от 1987 година, където максималното земно ускорение за територията на град София е равно на 2.7 m/s².



Фиг. 10 Аксонометрия на триизмерния модел на сградата

VI.2.2 Резултати от проведения анализ

Изчислени са изходящи "output" спектри в резултат на реагирането на конструкцията отразяващи влиянието на геоложките теренни условия надлъжно на профил София 2 за характерна сграда за град София. Изходните спектрални криви, при затихване 5% (спектрално ускорение за период) за всеки от двата терена. Максималните стойности са приблизително равни на 0.4s, което съвпада с главния период на сградата.

VI.2.3 Изчисляване и разпределение на динамичен фактор на територията на град

София

Разпределението на максималния динамичен фактор (DF=SA(T)roof/SA(T)base) върху площ от 25 km² е показано на Фиг. 11. За азимут 0° (a), 90° (b) and 180° (c). По вертикалната ос, максималния динамичен фактор (DF) е ограничен до 7 и за трите азимута. На Фиг. 11 (a,b,c) максималния динамичен фактор (DF) е отчетен за азимут 0°, докато минималния динамичен фактор е при азимут 180°. Динамичния фактор 7 е максималното очаквано ниво на линейно поведение на конструкциите.

Съставената база данни от генерираните сеизмограми и спектри на реагиране може да послужи за минимизиране на бъдещи загуби, като спомогне за правилното антисеизмично проектиране на сградите. От конструктивна гледна точка е необходимо да се направи карта на зоните на сеизмичен хазарт за да се регулира сеизмичната безопасност на новите сгради.





VI.3.1 Конструктивен модел на масивната сграда използвана при изчисленията

Разглежданите числени примери в тази глава са на база реагирането на пет етажна стоманобетонна сграда (Фиг.11 Аксонометрия на триизмерен модел на сградата), характерна конструкция за територията на Р. България, проектирана според изискванията на българския сеизмичен код от 1987 година. Анализирането на сграда е осъществено посредством програмата за крайни елементи SAP2000. Разгледани са два случая. Първи случай, когато сградата е запъната в основата, следователно почвените условия под сградата не са отчетени. Във втория случай взаимодействието почва-конструкция (SSI) е моделирано посредством пружини и на (Фиг. 13) е дадена схема на проблема взаимодействие почва-конструкция (SSI).



Направен е анализ на влиянието на фундирането, геологията и механизма на източника, върху динамичното реагиране на сградата, едновременно при запънат модел (FB) и при модел отчитащ влиянието почва конструкция (SSI).

В план сградата има дължина 22м и широчина 14м (размери по оси х и у) и обща височина от 15м (ос z). Характеристики на материала: бетон B20 с модул на еластичност $E=2.75*10^7$ kN/m². Главен период на запънатия модел е T₁=0.394 s.

Структурния модел на сградата има почти симетричен план на етажа и центровете на масите и коравините почти съвпадат.

Главната идея е изследването на влиянието на почва конструкция върху реагирането на конструкцията. Използвайки методологията "elastic half space", виж са изчислени коравините на пружините. Използвани са следните характеристики на почвата:

Обемна плътност на почвата: 21.5 kN/m³;

G модул на почвата: 400 MPa;

Коеф. на Поасон: 0.4;

Общо тегло(weight) на конструкцията: 22000 kN;

Числените стойности на коравините на пружините са:

Ky = 196E+5 kN/m - транслационна коравина по глобална посока Y;

Kz = 258E+5 kN/m – транслационна коравина по глобална посока Z;

Kxx = 123E+7 kN.m/rad – ротационна коравина около глобална координата X;

Куу = 226E+7 kN.m/rad – ротационна коравина около глобална координата Y;

Kzz = 212E+7 kN.m/rad – ротационна коравина около глопална координата Z.

Изчислените коравини са разпределени по опорните възли на модела. За да се опрости процедурата е прието константно 5% затихване на пружините. Фундаменталния период на модела почва конструкция е T_1 =0.49 s.

VI.3.2 Динамично реагиране на двата модела: FBM и SSIM

Тази част обобщава изчислените характеристики на реагирането на сградата едновременно за конфигурациите (FB) и (SSI). Анализът "time history" е осъществен посредством трикомпонентни акселерограми. От резултатите на настоящото изследване могат да се направят следните заключения.

VI.3.2.1 Влияние на геоложките условия върху поведението на конструкцията

Хоризонталната резултанта на спектъра на реагиране SA(T)REZ е изчислено, като корен от сумата на квадратите на двата хоризонтални спектри на реагиране,

SA(T)TRA и SA(T)RAD, т.е. $SA(T)_{REZ} = SQRT(SA(T)_{TRA}^{2} + SA(T)_{RAD}^{2})$. Кота терен се намира на височина 3м, втори етаж е на височина 6м, аналогично за другите етажи, кота покрив е на височина 15м.



Фиг. 14 Хоризонтална резултанта на спектъра на реагиране, изчислен като корен квадратен (SQRT) по височина на сградата за модел FBM и геоложки профил Sf1.



Фиг. 16 Хоризонтална резултанта на спектъра на реагиране, изчислен като корен квадратен (SQRT) по височина на сградата за модел FBM и геоложки профил Sf3.



Фиг. 18 Хоризонтална резултанта на спектъра на реагиране, изчислен като корен квадратен (SQRT) по височина на сградата за модел FBM и геоложки профил Sf3 и за Sce 2.



Фиг. 15 Хоризонтална резултанта на спектъра на реагиране, изчислен като корен квадратен (SQRT) по височина на сградата за модел SSIM и геоложки профил Sf1.



Фиг. 17 Хоризонтална резултанта на спектъра на реагиране, изчислен като корен квадратен (SQRT) по височина на сградата за модел SSIM и геоложки профил Sf3.



Фиг. 19 Хоризонтална резултанта на спектъра на реагиране, изчислен като корен квадратен (SQRT) по височина на сградата за модел SSIM и геоложки профил Sf3 и за Sce 2.

VI.3.2.2 Влияние на сеизмичния механизъм върху усилването

Влиянието на сеизмичния механизъм върху усилването, изразено като отношение (SQRTSAi/SQRTSAinp) между SQRTSAi на i-то ниво на конструкцията и входящия спектър на реагиране Sainp са дадени на Фиг. 20, Фиг. 21, Фиг. 22 и Фиг. 23. Влиянието на сеизмичния механизъм върху усилването е незабележимо за FBM за периода в границите T~0.2-0.4 s



Фиг. 20 Увеличение по височина на сградата, изчислено като отношение SQRTSA_i/SQRTSA_{inp} за FBM за геоложки профил Sf3.



Фиг. 22 Увеличение по височина на сградата, изчислено като отношение SQRTSA_i/SQRTSA_{inp} за модел FBM и за геоложки профил Sf3.

Фиг. 21 Увеличение по височина на сградата, изчислено като отношение SQRTSA_i/SQRTSA_{inp} за SSIM за геоложки профил Sf3.



Фиг. 23 Увеличение по височина на сградата, изчислено като отношение SQRTSA_i/SQRTSA_{inp} за модел SSIM и за геоложки профил Sf3.

VI.3.2.3 Извод

Изследването показва, че локалната геология и механизмът на източника оказват влияние върху изменение на ускорението по височина по време на силно земетресение. Анализът показва, че при отчинането на влиянието на геологията не можем напълно да пренебрегнем влиянието на сеизмичния механизъм на източника, тъй като при земетресения на малки разстояния влиянието на източника е доминиращо. Обещаваш подход при оценка на взаимодействието почва-конструкция е многоетапния подход. Практическото приложение на отчитане влиянието почва-конструкция е намаляване на етажните ускорения и премествания, с цел защита на чувствителна апаратура и неструктурни елементи.

Научни и научно приложни приноси

I. Научни приноси:

I.1. Изследване на вероятностното разпределение на продължителността на разрушителната фаза на синтезирана акселерограма за гр. София.

I.2. Разработен е подход за верифициране на синтезирани сигнали с реални записи.

II. Научно приложни приноси:

II.1. Направен е параметричен анализ на генерирани сеизмични сигнали с отчитане влиянието на механизма на източника и средата на разпространение.

II.2. Направен е анализ за влиянието на механизма на източника, инженерно геоложките характеристики, фундирането върху динамичното реагиране на типичен клас сгради за гр. София.

II.3. Направена е оценка на площното разпределение на динамичен фактор върху площ от 25 кв. км. на територията на гр. София, като динамичния фактор характеризира максималното очаквано ниво на линейно поведение на сграда.

Научни публикации свързани с дисертационния труд

- Paskaleva I., Koleva, G., 2006, An approach for assessing parameters for structural control devices (M=7), International Conference on Civil Engineering Design and Construction, Varna, Bulgaria: 267-273.
- Paskaleva I., Koleva, G., 2006, An approach for assessing parameters for structural control devices (M=6.3) Second part, International Symposium on Modern Technologies, Education and Prof. Practice in Geodesy and Related fields, Sofia.
- Koleva G., Vaccari F., Paskaleva I., Zuccolo E., Panza G.F., 2008, An approach of Microzonation of the Sofia City, Acta Geod. Geoph.Hung, Vol.43(2-3).
- Paskaleva I., Koleva G., Vaccari F., Panza G.F., 2008, Seismic Vulnerability Assessment for Massive Structure: Case Study for Sofia City, Seismic Engineering Conference Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake, AIP.
- Paskaleva I., Koleva G., Vaccari F., Zuccolo E., Panza G.F., 2008, A contribution to the assessment of the seismic vulnerability of large structures in Sofia city, Harmonization of Seismic Hazard in Vrancea Zone, Springer book: 151-162.
- Paskaleva I., Koleva G., Vaccari F., Stefanov D., Panza G.F., 2009, A contribution to structural health monitoring using synthetic motions, International Conference UACEG 2009: Science&Practice, Univercity of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Sofia, Bulgaria (CD);

Презентации на дисертационния труд на научни форуми

- Paskaleva I., Koleva, G., 2006, An approach for assessing parameters for structural control devices (M=7), International Conference on Civil Engineering Design and Construction, Varna, Bulgaria.
- Paskaleva I., Koleva, G., 2006, An approach for assessing parameters for structural control devices (M=6.3) Second part, International Symposium on Modern Technologies, Education and Prof. Practice in Geodesy and Related fields, Sofia, Bulgaria.
- Paskaleva I., Koleva G., Vaccari F., Zuccolo E., Panza G.F., 2008, A contribution to the assessment of the seismic vulnerability of large structures in Sofia city, NATO conference: Harmonization of Seismic Hazard in Vrancea Zone, Chisinau, Moldova.
- Paskaleva I., Koleva G., Vaccari F., Stefanov D., Panza G.F., 2009, A contribution to structural health monitoring using synthetic motions, International Conference UACEG 2009: Science&Practice, Univercity of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Sofia, Bulgaria / Joint ICTP/IAEA Advanced Workshop on Earthquake Engineering for Nuclear Facilities, ICTP, Trieste, Italy.

Участия в научни проекти

- International project NATO-SfP980468: "Harmonization of Seismic Hazard and Risk Reduction in Countries Influenced by Vrancea Earthquakes"; Research work in "Research center of Earthquake engineering", METU, Ankara, Turkey – 2007 (one month);
- Seismic Microzonation of the site for business building 34 stories, district Lozenec, Sofia, Bulgaria";
- International project: "Seismic effect assessment for prehistoric events according to engineer-seismological methods";

Други публикации

- Paskaleva I., Szeidovitz G., Kostov K., Koleva G., Nikolov G., Gribovzsky K., 2006, Calculation the peak ground horizontal acceleration generated by paleoearthquake from failure tensile stress of speleothem, International Conf on Civil Eng Design and Construction, Varna, Bulgaria: 281-286.
- Koleva G., Sandu I., Akkar S., 2008, Estimation of maximum interstory drift Ratio for shear-wall type structures, Harmonization of Seismic Hazard in Vrancea Zone, Springer book: 225-239.