Физико-технологичен факултет - Пловдивски университет "Паисий Хилендарски"

Катедра Физика

Делко Атанасов Златански

Изследване на спектралните характеристики на случаен сеизмичен шум в плитката земна кора

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

На дисертационен труд за получаване
на научна и образователна степен *Доктор*

Област на висше образование**: 4. Природни науки – математика и информатика**
професионално направление**: 4.1 Физически науки**
Докторска програма: **„Структура, механични и термични свойства на кондензираната материя“**

Научен ръководител:
доц. д-р Драгомир Колев Господинов

Пловдив 2021

Въведение

Значение на темата на дисертацията – Една от основните насоки на изследване за намаляване на последствията от силни земетресения е оценка на сеизмичния хазарт и съобразяване на изискванията за планиране и строителство с тази оценка. Крайните резултати от оценката на сеизмичния хазарт се изразяват в определяне на очакваното максимално въздействие за дадено място от сеизмични събития в определен период от време, изразено в макросеизмична интензивност или максимално ускорение, скорост или преместване. Процедурата се нарича сеизмично райониране, когато се разглежда в национален или регионален мащаб и микросеизмично райониране, когато се извършва за конкретно селище или обект. Като научно направление оценката на сеизмичния хазарт търпи интензивно развитие през последните години. Резултатите от него се ползват при планиране, оценка на старо и извършване на ново строителство, като по този начин могат значително да намалят последствията от бъдещи силни земетресения.

Анализът на сеизмичния хазарт включва три основни елемента, а именно:

- Изследване на сеизмичните източници. Дефинират се отделните сеизмични зони и се изследва сеизмичният процес в тях във времеви и енергетичен аспект. Идентифицират се зоните, чиято сеизмичност би въздействала върху дадена изследвана област.
- второто поднаправление изучава затихването на сеизмичните вълни с нарастване на разстоянието от източника. Разработват се емпирични зависимости, които показват как намалява амплитудата на сеизмичните вълни с разстоянието, за да се определи стойността и в точката на изследване.
- не по-малко важен елемент на сеизмичния хазарт е изучаването на влиянието на локалните условия върху сеизмичното въздействие. Локалният дълбочинен строеж, хидрогеоложките условия и вида скали могат да доведат до по-силно затихване на сеизмичния сигнал или обратното – до усилването му.

Имено актуалността на третия елемент (локалните условия) определя значението на избраната тема в дисертацията. Различията в локалната структура на плитката земна кора в различни места водят до различия в спектралните характеристики на сеизмичните вълни, които биха въздействали в тези точки и от там до различия в оценения сеизмичен хазарт и сеизмичен риск, включващ и поведението на построение сгради в тези места. Информация за плитката земна структура може да бъде получена по различни геофизични методи, включващи сеизмика, електромагнитни проучвания, гравиметрия и други. В последните години навлезе ново направление за изследване на плитката и по-дълбока структура на земната кора и горната мантия чрез анализ на записи на случаен сеизмичен шум.

Значението на настоящата дисертация се състои и в това, че в нея са извършени изследвания на някои параметри на плитката земна кора (фундаментална честота, скорост на напречните сеизмични вълни, дълбочина до основна скала) за избран район в гр. Пловдив, които имат отношение при оценката на сеизмичната опасност. Тези изследвания са важни, като се има предвид, че Пловдив се намира в силно сеизмична зона (Маришки шев) и последните силни земетресения в тази зона от 1928 г. са довели до 115 жертви и големи материални щети.

Използването на този метод е актуално, защото той е бърз, евтин и дава достатъчно точни резултати. Допълнително оптимизиране на методиката може да се постигне ако се използва по-лека апаратура, която освен това да позволява бързо прехвърляне и анализ на записите на персонален компютър.

Цели на извършената работа в дисертацията – Настоящата докторска работа има за цел първо да покаже обзорно методите за изследване на структурата на плитката земна кора чрез анализ на случаен сеизмичен шум и влиянието на локалните условия върху сеизмичния хазарт, и второ, да изследва приложимостта на конкретен метод в това направление, а именно метода на спектрално съотношение на хоризонтална към вертикална спектрална компонента (HVSR) на случаен сеизмичен шум.

Да се разработи безжична микропроцесорна система за цифров запис на микросеизмичен шум – Ambient Noise Accelerometer (ANA). Обоснована е необходимостта от разработка на тази система. Представена е пълната схема на устройството, както и всички отделни съставни компоненти, от които е изградена. Показан е начинът на свързване на всички елементи и съставните модули. За програмиране на микроконтролера е написан програмен код, чрез който микроконтролерът е програмиран. Максимално оптимизирано е захранването на отделните модули на схемата като консумацията на ток в режим на измерване е намалена до 24mA. Представена е блок схема на разработената микропроцесорна системата.

В експерименталната част на дисертацията са избрани набор от точки в неизследвана част на град Пловдив. На базата на регистриран сеизмичен шум в тези точки се определя така наречената фундаментална честота за всяка точка на регистрация, която има отношение при оценката на сеизмичния хазарт. Разгледана е и връзката между определените фундаментални честоти и резонансните честоти на сгради в близост до точките на регистрация на сеизмичен шум. Направено обобщение на извършената работа на докторанта и получените нови резултати, като са показани предимствата на H/V методиката за оценка на локалните ефекти при наличие на сеизмично въздействие. Представена е мрежа от точки в западната част на гр. Пловдив, в която са извършени записите. Анализите от всяка точка са нанесени в таблица, представяща подробно получените стойности за фундаменталните честоти от извършения анализ. Интерпретирани са получените резултати от гледна точка на сеизмичния хазарт. Показано е значението на извършените в дисертацията изследвания и получените резултати, както от научна, така и от приложна гледна точка.

1 Обзор на методите за анализ на случаен сеизмичен шум при оценка влиянието на локалните условия върху степента на въздействие от земетресения

1.1 Случаен сеизмичен шум

В геологията и други сродни дисциплини сеизмичният шум е общо наименование за сравнително устойчива вибрация на земята, поради множество причини, като шумът се счита за неинтерпретируем или нежелан компонент на сигналите, регистрирани от сеизмометрите.

Физически сеизмичният шум се състои най-вече от повърхностни вълни. Вълните с ниска честота (под 1 Hz) обикновено се наричат микросеизми, а високочестотните вълни (над 1 Hz) – микротремори. Причините за възникване на такъв род вълни в Земята включват човешки дейности наблизо (като трафик или тежки машини), ветрове и други атмосферни явления, както и океански вълни.

Микросеизмите (Dimitrova, 2009) представляват обект на изследване вече повече от сто и четиридесет години, като те представляват интерес както от гледна точка на проучване на техния произход, така и на тяхното използване. Те са слаби колебания на земната кора и се явяват суперпозиция на колебателни процеси, несвързани помежду си и от различни сеизмични източници. Микросеизмичните вълни са характерни за всяка точка на Земята. В трептенията участват по-плитки и по-дълбоки части от земната кора, а също така и горната мантия. Това позволява микросеизмите да предоставят възможност за изследване на земната среда както в нейната плитка структура, така и до голяма дълбочина.

От друга страна случайният сеизмичен шум сам представлява обект на научни изследвания, като един от основните въпроси е неговото генериране. Една от първоначално предложените теории е, че микросеизмите се обясняват с въздействието на морските вълни в бреговите зони. Последващите обяснения са свързани с генериране на колебания от въздушните маси в атмосферата през повърхността на моретата и океаните, а така също и през определени области от сушата. Генерираните колебания се разпространяват по твърдата земна повърхност във вид на различни типове сеизмични вълни. Тези вълни в по-голямата си част са повърхностни вълни на Релей и Лав, което може да се обясни и с факта, че повърхностните вълни затихват значително по-бавно.

Сеизмичният шум е от значение за всяка дисциплина, която е свързана със сеизмологията като геология, сеизмично райониране, търсене на нефт и полезни изкопаеми, хидрология и инженерни аспекти на земетресенията и структурен мониторинг на вече построени обекти.

В много случаи сеизмичният шум създава проблеми при дейности, които са чувствителни към вибрации, като например точни измервания, прецизно фрезоване, телескопи и израстване на кристали. От друга страна, сеизмичният шум има някои практически приложения (Oynakov, 2017), например за определяне на динамичните свойства на строителните конструкции, като мостове, сгради и язовири; или за определяне еластичните свойства на почвата и земната среда с цел изготвяне на сеизмични карти на микрорайониране, показващи реакцията на земната среда и конструкциите на земетресенията.

Изследванията за произхода на сеизмичния шум (Bonnefoy-Claudet et al., 2006) показват, че нискочестотната част на спектъра (под 1 Hz) се дължи на естествени причини, главно океански вълни. По-специално пикът между 0,1 и 0,3 Hz е ясно свързан с взаимодействието на водни вълни с почти равни честоти, но с противоположни посоки (Kedar et al., 2008; Ardhuin et al., 2011). При висока честота (над 1 Hz)

сеизмичният шум се генерира главно от човешки дейности, като автомобилен трафик и промишлена работа, но може да има и природни източници, като реки. За честоти около 1 Hz вятърът и другите атмосферни явления също са основен източник на наземни вибрации (Schmandt et al, 2013).

Амплитудата на сеизмичните вибрации обикновено е от порядъка на 0,1 до 10 μm/s. Предложени са модели с висок и нисък шум като функция от честотата (Withers et al., 1996). Сеизмичният шум включва малка част обемни вълни (P- и S-вълни), като преобладават повърхностните вълни (на Лав и на Релей). Тези вълни са дисперсивни, което означава, че тяхната фазова скорост варира с честотата (обикновено тя намалява с увеличаване на честотата). Тъй като кривата на дисперсия (фазова скорост като функция на честотата) е тясно свързана с промените на скоростта на напречната вълна с дълбочина в различните слоеве на земната среда, тя може да се използва като неинвазивен инструмент за изследване на подземната структура.

Амплитудата на сеизмичния шум е много ниска и не може да се усети от хората. Тяхната амплитуда е била също твърде ниска, за да бъде регистрирана от първите сеизмометри в края на 19 век. Въпреки това, по това време известният японски сеизмолог Фусакичи Омори вече може да записва вибрации в сгради, където амплитудите са увеличени. Той намира резонансните им честоти и изучава вибрациите като функция на настъпилите повреди (Naderyan et al., 2016).

Различните подходи за оценка на локалните ефекти могат да бъдат разделени на два различни вида: 1 – преки (на място) наблюдения и/или измервания, и 2 – числено моделиране на базата на наличната геотехническа информация (*Bard*, 1994). При разглеждане на методите в докторската работа ще се следва същото подразделение и ще се представят различните емпирични техники за изучаване на локалните въздействия, както и главните им предимства и недостатъци. Информация за прилагане на числено моделиране на базата на геотехническа информация може да се намери в (*Bard*, 1994; *Field and Jacob*, 1995; *Wald and Mori*, 2000).

Преките методи от своя страна също могат да бъдат разделени на две групи, активни и пасивни, в зависимост от начина на генериране на изследвания сигнал. Активните сеизмични методи изискват принудително генериране на сондиращи вълни, като това позволява да се знаят характеристиките на източника (взрив, виброизточници). При тези методи (метод на отразените вълни – МОВ; метод на общата дълбочинна точка – МОДТ; метод на пречупените вълни - МПВ и други) обикновено се анализират обемни вълни, като целта е дължините на сондиращите вълни да са значително по-малки от характерните размери на изследваните структури. Ето защо необходимостта от малка дължина на вълната изисква използване на относително високочестотна област от спектъра за работен честотен диапазон на измерване.

При пасивните методи се използва съществуващото вълново поле, което може да има както природен, така и техногенен произход. Съществено предимство на тези методи е, че те не причиняват вреда на окръжаващата среда и могат да се провеждат и в градска среда. При пасивните методи естествени източници на сеизмични вълни могат да бъдат локални и далечни земетресения, морските вълни в крайбрежните зони, вулкани, вятърът и подобни природни явления. Примери за техногенни източници са градският шум, вибрации от индустриални източници и др.

Понякога пасивната сеизмика се нарича и „нискочестотна” поради факта, че високочестотните сеизмични вълни затихват по-бързо. Ето защо голяма роля в пасивните сеизмични методи играят повърхностните вълни, които са по-нискочестотни и повечето източници на сеизмични вълни са близко до повърхността на Земята. Характерно за повечето пасивни методи е, че те имат стохастичен характер, като от там произлиза и названието случаен сеизмичен шум.

За България по-детайлни изследвания на сеизмичен шум се извършват през последните 15 години (Kandilarov, 2005; Gospodinov ey al., 2007; Kandilarov et al., 2009; Dimitrova, 2009; Oynakov, 2017; Gospodinov et al., 2018; Gospodinov & Zlatanski, 2018; Zlatanski & Gospodinov, 2019)

1.2 Референтни методи за анализ на локалните условия

Значителна част от методите, в които се използва анализ на регистрирани сеизмични вълни, се базират на сравнение на някои от характеристиките на записите в изследваните точки, например амплитудният им спектър, с този на избрано еталонно място, чиито характеристики са известни. Тези еталонни точки се наричат референтни, като такова име носят и методите, които ги използват. Важна особеност на референтните методи е, че при тях в повечето случаи се използват земетресения като източници на сеизмични вълни.

Стандартно спектрално съотношение (Standard Spectral Ratio – SSR) **–** Една от най-често използваните техники, която дава най-точни и надеждни резултати е техниката на стандартното спектрално съотношение (ще използваме това име на метода, както е предложено от проф. А*takan,* (1995), а други автори го наричат метод на класическото спектрално съотношение (*Ozel et al.*, 2002). Методът първоначално е предложен от *Borcherdt* (1970) за изследване на ефектите на локалните геоложки условия върху сеизмичните движения на земната повърхност в близост до Сан Франциско. Идеята на метода е да се направи оценка на очакваните местни ефекти от бъдещо земетресение чрез оценка на локалната реакция за дадено място върху седименти, сравнено с място върху кристалина скала в същия район. Разработката на SSR техниката се основава на предположението, че спектралните характеристики, дължащи се на сеизмичния източник и пътя на вълните са еднакви за две различни точки, ако те са близо една до друга. Теоретичната обосновка на метода ще бъде представен накратко в следващите редове (*Borcherdt,* 1970).

Фиг.1.1 Разположение на точките на регистрация при метода на стандартно спектрално съотношение. Референтната точка трябва да е на основната скала, а точките на изследване да са на седиментите

Както беше споменато по-горе, направено е предположението, че двата обекта са близо един до друг и източникът, и спектралните условия се считат за еднакви. Ако използваме данните от гъста локална сеизмична мрежа и източникът е много по-далеч от зоната на мрежата, то всички тези предположения са валидни и можем да получим надеждни резултати. Може да получим достоверни резултати дори, ако сеизмичната мрежа, която използваме не е гъста и разстоянието източник-мрежа е подобно на разстоянието между две отделни станции – например, можем да групираме станциите по подходящ начин, да изчислим средната реакция на мрежата и да я използваме вместо референтна станция (*Rogers et al.*, 1984). Ще бъдат посочени накратко два класически примера, когато този метод е бил използван и е установена добра корелация между резултатите и минали събития (*Borcherdt,* 1970). Математически стандартното спектрално съотношение се изразява с формула (1.1)

$$\frac{U_{ij}(f,r)}{U_{ik}(f.r)} = \frac{S_i(f)Z(f)_j A_{ij}(f,r)}{S_i(f)Z(f)_k A_{ik}(f,r)} \qquad (1.1)$$

където U_{ij} (f, r) е спектралната амплитуда на земното движение, наблюдавана на място за запис j за събитие i, S_i (f) е функцията на източника, Z_j (f) е реакцията на мястото, A_{ij} (f, r) е отчитане на функцията за затихване, което включва ефекта на геометрично разпространение. F е честотата, r хипоцентралното разстояние и k обозначава еталонната станция. Трябва да се отбележи, че земното движение, записано на една станция, се счита за конволюция на три величини, по-специално на източника $S_i(f)$, пътя $A_{ij}(f, r)$ и реакцията на мястото $Z_j(f)$. Ако станциите са наблизо и референтната станция не се влияе от ефектите на сайта, тогава $Z_k = 1$ и $A_{ij}(f, r) \approx A_{ik}(f, r)$. По този начин спектралното съотношение директно задава реакцията на мястото в нереферентните станции.

Методът е използван от *Borcherdt* за оценка на влиянието на местните геоложки условия върху земното движение в различни точки близо до залива Сан Франциско. Той използвал данни от слаби движения при няколко отдалечени ядрени тестове в Невада, данни за силни движения от земетресението в Сан Франциско през 1957 год. И микросеизмични данни. Спектрите на реагиране за различни места били изчислени и сравнени, и било показано, че честотните характеристики на спектрите за различите видове данни са много сходни (*Borcherdt*, 1970). Спектрите на реагиране обаче, определени от данните за ядрените експлозии и земетресението били с по-добро качество от тези, определени от данни за микросеизми. Изчислените коефициенти на увеличение били сравнени с макросеизмичните интензивности от голямото земетресение през 1906 год. В Сан Франциско, наблюдавани на същите места и е била установена добра корелация.

Методът SSR е използван и от *Singh* et al. (1988) за оценка на локалната реакция (Фурие спектри на ускорението) в различни части на Мексико Сити, използвайки данни от широка дигитална мрежа за силни движения, инсталирана в града през 1987 год. Авторите са показали, че за територията на Мексико Сити спектралните съотношения са относително независими от магнитуда, азимута и дълбочината на земетресения, имащи епицентри на 200 или повече километра от града. Ако се знае спектралното

съотношение на ускорението за дадена точка, сравнено с това за референтен сайт, то тогава въздействието от дадено събитие върху изследваното място може да се оцени като се умножи спектърът на реагиране на мястото по спектъра на ускорението за земетресението, регистрирано в същото място – това е начина, по който автоматично се отчитат локалните ефекти. Други автори забелязват, че спектрите на реагиране за дадено място, за имащи еднаква енергия и местоположение са повторяеми в тази точка (*Rogers et al.*, 1984). Използвайки измерванията от няколко сравнително силни земетресения, които са станали в този регион между 1985 и 1988 год., *Singh* et al. (1988) и колегите му са изчислили относителните спектри на увеличение за различни части на града. Задавайки честотен диапазон около естествената честота на сайта, те са определили област, в която е надхвърлено определено прагово ниво на относителното увеличение (*Singh et al.*, 1988). Те показват, че тази област съвпада с областта, в която са наблюдавани максимални повреди и срутвания на сгради по време на земетресението в Мексико сити от 1985 г. SSR методът има и недостатъци (*Atakan*, 1995; *Bard*, 1994), някои от които са следните:

- *Намирането на подходящо място* – често е невъзможно да се намерят подходящи референтни сайтове. Най-добрият избор е на сайт, намиращ се върху плоска повърхност и кварцова скала.
- *Стартиране (тригериране) на мрежата* – ако работим с мрежа, която сработва при определено ниво, тогава често поради различия в нивото на шума на различните места, не всички станции от мрежата ни ще се включат. Ако една от тези станции е на референтния сайт, ще бъде невъзможно да се изчисли стандартното спектрално отклонение (*Bard*, 1994).
- *Различното ниво на шума в референтния сайт и в сайта, който ни интересува* – винаги нивото на шума от референтния сайт, разположен на твърда скала е по-ниско от нивото на шума на изследвания сайт, който обикновено е разположен върху по-меки материали. Така в референтния сайт шумът има по-ниско ниво отколкото сайтът, чийто спектър на реагиране следва да бъде определен. Разликата в нивото на шума ще повлияе на формата на изчислената спектрална функция за референтния сайт.
- *Влияние на топографията на земната повърхност* – оголена скала обикновено се намира на открит връх на хълм или други издигнати топографски обекти. Както е известно, съществуват доказателства, че градове разположени на хълмове, претърпяват много по-големи щети, отколкото градове, разположени в предпланината (*Bard*, 1994). Различни автори твърдят, че съществуват инструментални доказателства, че топографията на повърхността може силно да въздейства на амплитудата и честотата на земното движение в дадена точка (*Bard*, 1994). Специфичният топографски облик на изследвания регион може да доведе до фокусиране и разфокусиране на пристигащите сеизмични вълни и да повлияе на регистрирания спектър. Затова, ако нашият референтен сайт е разположен близо до хълм, се очаква изчисленият спектър на реагиране да бъде повлиян до известна степен от топографията.
- *Влиянието на разстоянието, азимута и магнитуда на земетресението, използвани за оценка на реакцията на сайта* – както бе споменато по горе, проучванията на реагирането на сайта чрез SSR техниката се базират на предположението, че източникът е отдалечен достатъчно, така че пътищата на сеизмичните вълни от източника до всеки от двата сайта, както и моделът на излъчване на вълните са еднакви - така наречено предположение за далечно взаимодействие. Понякога обаче това не е така – ако

разстоянието от източника до всеки от двата сайта е сходно с разстоянието между двата сайта – в такива случаи SSR техниката може да бъде използвана след внимателно изследване на местонахождението на сайта и подходящо групиране на станциите, или както бе споменато по-горе, чрез разглеждане на средния спектър на реагиране за референтен (*Rogers et al.*, 1984).

• *Влияние на референтния спектър (този от референтния сайт) върху крайните резултати* – както е споменато от някои автори например (*Atakan*, 1995) при някои скални сайтове спектърът на реагиране не е плосък и не можем да извършим оценка на реакцията на изследваното място, използвайки SSR. Тъй като SSR изиска разделяне на спектъра на изследвания сайт на спектъра на референтния сайт, при наличие на смущения в последния (пик или понижение), ще се получат пикове и понижения и в изчислените спектрални съотношения, и това ще повлияе на крайните резултати. Както бе споменато по-горе, това в действителност може да бъде случаят, ако референтният сайт не е разположен върху кварцова скала и той самият има характерен спектър на реагиране (*Atakan*, 1995).

• *Влияние на вида на използваните данни – нелинейни ефекти* – както много автори посочват (*Aki*, 1993; *Atakan*, 1995), различни видове информация могат да бъдат използвани за оценяване на реакцията на изследвания сайт в зависимост от земетръсната активност на района.

Самите данни от записите могат да бъдат разделени на 4 различни типа:

- микротрусове
- слаби движения
- силни движения
- данни от изкуствени източници.

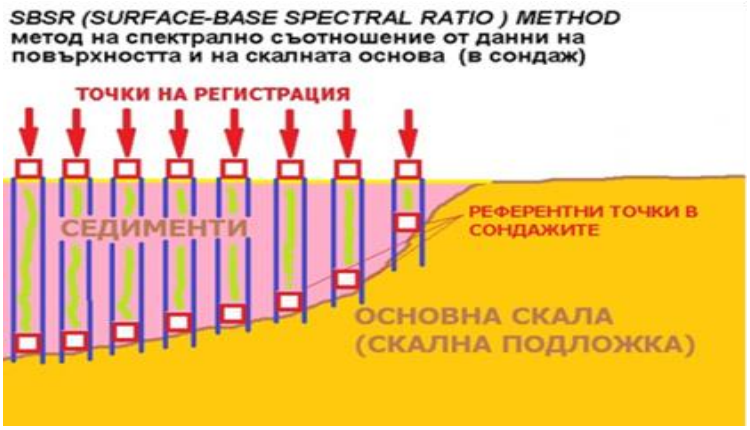
В зависимост от типа данни, които се използват, спектърът на реагирането ще бъде оценен с различно качество (*Borcherdt*, 1970). Най-подходящият тип данни, който можем да използваме за изчисляване на SSR са силни движения, тъй като по този начин влиянието на интересуващите ни събития, а именно силни земетресения е най-пряко. За определен сайт, който изследваме, това ще ни даде не само честотите, при които ще се появи най-голямото усилване, но също така и верния фактор на увеличение. В някои райони с ниска сеизмичност, обаче, може да нямаме данни за силни движения и трябва да се използват данни за слаби движения, за да се изчисли SSR. Увеличението обаче, определено от данни за слаби движения, обикновено води до надценяване на реалната стойност на усилване при силни земетресения. Това се дължи на нелинейните ефекти в почвата – налице е обща тенденция при увеличаване на магнитуда да се намалява усилването или дори може да се получи намаляване на амплитудата (*Aki*, 1993). Следователно ако изчислим SSR от данните за слаби движения, трябва да се има предвид, че ще имаме разумни оценки на честотите, при които ще се появят най-високите увеличения, но самото усилване може да не е правилно оценено. Въпреки, че е широко признато, че нелинейността съществува в някои случаи (*Borcherdt,* 1970), доказателства за нелинейно поведение на почвата не могат лесно да се изведат от данните. *Borcherdt* (1970) посочва, че спектралните увеличения, изчислени от данни за слаби движения (ядрени експлозии) и данни за силни движения (земетресението в Сан Франциско, 1957), се корелират много добре, макар и не в най-големи детайли. Други автори (*Ozel et al.*, 2002) забелязват, че не е имало огромна разлика между

усилванията, изчислени по данни за силни и слаби движения след главния трус в Измит, 1999 год. И след последвалите афтершоци. Затова когато избираме какъв тип данни да използваме, винаги трябва да имаме предвид нелинейното поведение на почвата.

Повърхностно-сондажно спектрално съотношение (Surface-Borehole Spectral Ratio – SBSR) – Ако знаем земното движение за конкретно сеизмично събитие на повърхността и на скалната основа под определен сайт, ще се получи много добра мярка за локалната реакция в сайта. Този метод за пръв път е представен от *Liu et al.* (1992) и е използван за оценка на сайт ефектите на област Марина до Сан Франциско, която претърпява изключителни щети по време на земетресението през 1989 год. В Лома Приета.

Този метод е сред един от най-надеждните за оценка на реакцията за дадено място. Идеята за този метод е да се изчисли спектралното съотношение за сеизмични данни, регистрирани едновременно с две станции – едната е разположена на повърхността, а другата – в скалната подложка под нея. За тази цел трябва да се направи сондаж, за да се достигне до скалната основа. Методът е наречен повърхностно-сондажно спектрално съотношение (*SBSR*) (*Atakan*, 1995). За експеримента в Марина са използвани две идентични сеизмични станции (описание на съоръжението е било дадено от *Atakan*, 1995).

Осем земетресения с високо съотношение сигнал/шум са били записани и за всяко от тях е определен спектърът на ускорение на земното движение за повърхността и за скалната основа. Представени са процедурите за спектралните изчисления и е обсъдена достоверността им (*Liu et al.*, 1992).



Фиг.1.2 Разположение на точките на регистрация при метода на повърхностно-сондажно спектрално съотношение. Референтните точки са в дъното на сондажа върху основната скала, а точките на изследване са на повърхността на седиментите до всеки сондаж

В представените резултати най-нискочестотният пик на спектралното съотношение се появява на една и съща честота за всички земетресения, а по-високочестотните пикове са разпръснати, тъй като по-високочестотната част от спектралното съотношение зависи от местоположението на земетресението и посоката на движение на земята.

Но дори и за най-нискочестотният спектрален пик усилването не е едно и също, а варира в големи граници. Било е установено, че дори за две много близки земетресения от дадена база данни стойностите на усилването за най-нискочестотния максимум не са дори близо един до друг – това може да се дължи на

зависимостта на спектралното съотношение от магнитуда. След разделяне на данните грубо на две по местоположението на земетресенията и изчисляване на спектралните съотношения поотделно за всяка една от базите данни, е било показано, че не само нискочестотните пикове съвпадат, но че има съответствие и при по-високите честоти (*Liu et al.*, 1992). Затова чрез внимателно подготвяне на базата данни, може да се получи надеждна оценка за честотното съдържание за спектъра на реакция за даден сайт – ще се намерят честотите, за които се получава максимално усилване на сеизмичните вълни.

Усилванията, обаче, за различните честоти не могат да се определят толкова добре. Това се дължи на факта, че спектърът на реакция е зависим от местоположението на земетресението и магнитуда му (*Aki*, 1993; *Borcherdt*, 1970; *Liu et al.*, 1992). Изглежда много вероятно, че честотната част на спектъра на реакция зависи от местоположението, докато усилването за различни честоти зависи от магнитуда (*Liu et al.*, 1992). Голямото предимство на метода е регистрирането в две станции една над друга, което води до това, че ефектите от източника и пътят на вълните са почти едни и същи в зависимост, разбира се, от разстоянието до регистрираното събитие и дълбочината на сондажа.

Използваният математически модел отново се базира на формула (1.1), като тук референтната точка не е една, а за всяка изследвана точка се определя съответна референтна точка, която се намира на дъното на сондажа под анализираното място върху основната скала.

Няколко са основните недостатъци в използването на *SBSR*:

Обратна връзка от повърхността. Както е посочено от някои автори, основният проблем при използването на *SBSR* е, че ще има обратна връзка от повърхността към сондажния сензор, тъй като той няма да регистрира само вълни, идващи от източника, но също и отразените от повърхността (*Safak*, 2001). С други думи повърхностният и сондажният записи са корелирани, което може да доведе до погрешни оценки на действителната функция на реакцията на изследвания сайт (*Safak*, 2001).

Затихване на шума, предизвикан от човешка дейност. Високочестотният шум, предизвикан от човека е дълбочинно зависим. Този шум намалява с дълбочината и нивото му в сондажната станция е много намалено – затова спектралното съотношение ще бъде повлияно от шума в повърхностния спектър (*Liu et al.*, 1992).

- Висока цена. С цел да се определят ефектите на сайта в по-голяма област, трябва да се направят много сондажи и проучването им ще **коства много средства и време.**

2 Метод на спектралното съотношение на хоризонтална към вертикална компонента на случаен сеизмичен шум (Horizontal to Vertical Spectral Ratio – HVSR)

При него използването на референтна точка спрямо, която се разглежда записа на определен вид вълна се заменя с анализа на спектралното съотношение на хоризонталната към вертикална съставяща на трикомпонентен запис на сеизмични вълни, като все повече по своя състав те не са вълни, генерирани от земетресение, а случаен сеизмичен шум.

Нереферентните техники позволяват да се избегне изискването за добра референтна станция за твърди скали. Те могат да се разделят в две групи в зависимост от това дали използваните сеизмични вълни са от

земетресение или са сеизмичен шум, но и двата метода могат да оценят задоволително основната резонансна честота на точката.

Техниката за спектрално съотношение EHV при използване на земетресения е въведена от Langston (1979) като метод за определяне на структурата на кората и горната мантия от телесеизмичните записи. Основното предположение на метода е, че вертикалният компонент на движение не се влияе от локалната структура, докато хоризонталните компоненти съдържат преобразуванията P-to-S поради геологията, стояща в основата на станцията. Следователно, чрез деконволюция на вертикалния компонент от хоризонталния, може да се оцени реакцията на мястото. Деконволюцията обикновено се осъществява чрез разделяне на спектри на Фурие на хоризонталния компонент на вертикалния. Операцията за деконволюция обаче се прилага за данни, смутени от наличния шум и тъй като този проблем е недобре изследван, малките грешки в данните могат да доведат до решения, неприемливи от физическа гледна точка. Налични са няколко техники на регуляризация, за да се избегнат артефакти в резултатите. Най-честата практика е да се извърши спектралното съотношение след изглаждане на спектрите. Техниката е приложена в много проучвания (например, Parolai и Richwalski, 2004 г.). Като цяло е установено, че съотношенията H/V за S вълни разкриват общата честотна характеристика на реакцията на мястото, дори ако нивото на усилване, особено при честоти, по-високи от основните, може да бъде различно от полученото чрез SSR анализ.

2.1 Изследвания върху вълновия състав на случайния шум, даващи физичната основа на HVSR метода

Интерпретацията на H/V спектралното съотношение е тясно свързана със състава на сеизмичното вълново поле, отговорно за околните вибрации, което от своя страна зависи както от източниците на тези вибрации, така и от подземната структура. То е свързано и с въздействието на различните видове сеизмични вълни върху съотношението H/V.

Разбирането на физическата същност и състав на вълновото поле на околния сеизмичен шум, особено в градските райони, изисква да се отговори на две групи въпроси, които не са независими един от друг:

• Какъв е произходът на околните вибрации (къде и какви са източниците)?

• Каква е природата на съответните вълни, т.е. обемни или повърхностни вълни? Какво е съотношението на обемните и повърхностните вълни във вълновото поле на сеизмичния шум? В рамките на повърхностните вълни какво е съотношението на вълните на Релей и тези на Лав?

• Както е известно, източниците на околни вибрации обикновено са разделени в две основни категории: естествена и човешка, които много често – и по-специално в градските райони – съответстват на различни честотни ленти (Bard, 2004):

• При ниски честоти (f < 1 Hz) произходът е по същество естествен, с особен акцент върху океанските вълни, които излъчват своята максимална енергия около 0,2 Hz. Тези вълни могат много лесно да се видят на острови и/или по време на океански бури. По-високите честоти (около 0,5 Hz) се излъчват по крайбрежните райони поради взаимодействието между морските вълни и бреговете.

• При високи честоти (f > 1 Hz) произходът е свързан предимно с човешката дейност (трафик, машини); източниците са най-вече разположени на повърхността на земята (с изключение на някои източници като метро) и често проявяват силна променливост относно ден/нощ и седмица/уикенд.

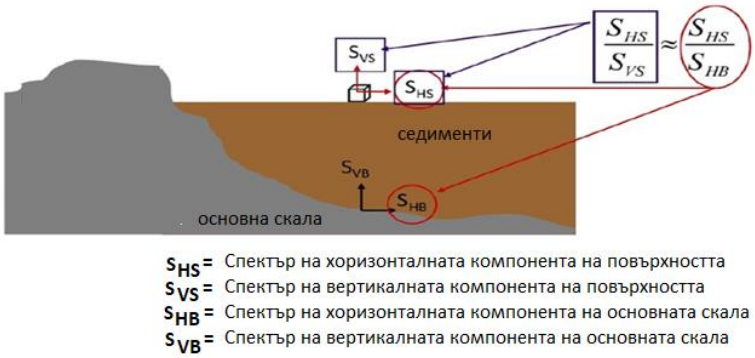
Ограничението от 1 Hz е само показателно и може да варира от един град до друг. Някои специфични строителни работи (магистрали, язовири), включващи много големи двигатели и/или камиони, също могат да генерират енергия с ниска честота. На местно ниво тази граница може да бъде намерена чрез анализ на разликите в амплитудата на сеизмичния шум между деня и нощта, както и между дните на работа и почивка.

Енергийните нискочестотни източници често са отдалечени (намиращи се в най-близките океани), а енергията се пренася от източника до мястото чрез повърхностни вълни, насочени в земната кора. Въпреки това, на местно ниво тези вълни могат (и всъщност често са) да взаимодействат с местната структура (особено дълбоките басейни). Дългата им дължина на вълната индуцира значителна дълбочина на проникване, така че полученото локално вълново поле може да бъде по-сложно (Bard, 2004).

Освен тази много качествена информация, има само много малко информация за количествените пропорции между обемните и повърхностните. Няколко резултати, предложени от Bonnefoy-Claudet et al. (2004) показват, че нискочестотните микросеизми (f <1 Hz) се състоят предимно от вълни на Релей, докато няма реален консенсус за по-високи честоти (> 1 Hz).

2.2 Математическа основа на HVSR метода

Методиката на хоризонтално-вертикалното (H/V) сеизмично спектрално съотношение на шума (NHV) е предложено за първи път от Nogoshi и Igarashi (1970 и 1971). Nakamura (1989) преразглежда тази методика и оттогава в областта на оценката на локалните ефекти са публикувани голям брой изследвания, които я използват.



Фиг.2.1 Илюстрация на метода на спектралното съотношение на хоризонтална към вертикална компонента на случаен сеизмичен шум (Horizontal to Vertical Spectral Ratio – HVSR). Спектралното съотношение на хоризонтална към вертикална компоненти на случаен шум, регистрирани на повърхността е приблизително равно на спектралното съотношение на хоризонталната компонента на повърхността към тази на основната скала

Тази методика е с ниска цена, бърза е, неразрушителна и следователно доста атрактивна (Bard, 1999; Parolai et al., 2010).

Докато в интерпретацията на Nakamura спектралното съотношение NHV е пряко свързано с реакцията на мястото за S-вълната, по-голямата част от сеизмологичната/инженерната общност, базирана на резултатите от по-късни проучвания, е по-склонна да разглежда преобладаващата роля на повърхностните вълни (виж напр. Бард, 1999).

Математическата основа на HVSR техниката (по-правилно е да се обозначава като NHVSR, защото ползва случаен шум, но се е наложило първото обозначение) може да се получи по следния начин. Дефинира се трансформираща функция на повърхностните слоеве като:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \tag{2.1}$$

където S_{HS} е спектърът на хоризонталните движения на повърхността, а S_{HB} е спектърът на хоризонталните колебания на земята на границата между повърхностния слой и основната скала. Според Nakamura спектърът на хоризонталните движения на повърхността се влияе от сеизмичния шум в този слой, който присъства като Релееви вълни (*Nakamura*, 1989; 2000). Ефектът от Релеевите вълни трябва да бъде отразен в спектъра на вертикалните земни колебания на повърхностния слой S_{VS}, но не трябва да бъде включен в спектъра на вертикалните движения на основната скала S_{VB}. Ефектът на Релеевите вълни върху вертикалните вибрации би трябвало се определя от трансформиращата функция E_S, дефинирана по долу:

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \tag{2.2}$$

Ако няма Релеева вълна тогава $E_S = 1$. Затова ако се приеме че $E_S = 1$ на границата основна скала/седименти, то можем да разделим трансформиращата функция S_T без да и повлияем.

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S} \tag{2.3}$$

Тогава ще се получи друга трансформираща функция:

$$S_{TT} = \frac{\frac{S_{HS}}{S_{HB}}}{\frac{S_{VS}}{S_{VB}}} \tag{2.4}$$

Или:

$$S_{TT} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} . \frac{S_{VB}}{S_{HB}} \tag{2.5}$$

Както емпирично е показано от Nakamura, съотношението $\frac{S_{HB}}{S_{VB}}$ е приблизително единица за широк честотен диапазон. Затова трансформиращата функция S_{TT} може да бъде оценена само чрез измерване на сеизмичния шум на повърхността, като се вземе спектралното съотношение на хоризонталните и вертикалните му компоненти

$$S_{TT} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \tag{2.6}$$

Техниката е известна още като техника на Накамура или H/V спектрално съотношение (HVSR). Използването на тази техника дава предимства, които ще обсъдим накратко по-долу.

1. Избягва се нуждата от референтен сайт като цяло. Както бе споменато по-рано, ако се използва SSR метода, не винаги е възможно да намерим подходящ референтен сайт. Също така е посочено, че спектърът на референтния сайт е твърде несъвършен – в него могат да съществуват пикове

или понижения, които да повлияят на изчисления спектър. Чрез използването на техниката на *Nakamura* се избягва изцяло необходимостта от използването на референтен сайт (*Nakamura,* 1989).

2. Избягва се необходимостта от чакане за сеизмични събития. Когато изчисляваме спектърът на реакция, използвайки SSR, трябва да се извършва регистрация постоянно, за да се запишат и земетресения. Необходимостта от постоянно записване за дълъг период от време не е проблем когато използваме описаната по-горе техника, защото всичко от което се нуждаем, е да запишем фоновия шум. Можем да направим този запис по всяко време и толкова дълъг, колкото изискват нашите изчислителни алгоритми.

3. Ниска цена. По отношение на двете техники SSR и *SBSR,* HVSR методът е евтин и добро изследване може да бъде направено, като се използват само една или няколко портативни станции.

Разбира се всичко това звучи твърде добре и трябва да споменем и някои от недостатъците на този метод, които по принцип са малко:

1. Ниска надеждност на оценените стойности на усилване. Според Накамура (1989) оценките за усилването, които представляват интерес, са добри както и резултатите за фундаменталната честота. Все пак други твърдят че корелацията между усилванията, получени чрез SSR и HVSR за едно и също място е много лоша (*Atakan,* 1995; *Bard,* 1994). Затова е възможно да се получат грешни оценки за усилването ако разчитаме само на H/V техниката .
2. Невъзможно да се получат най-високите хармонични функции на фундаменталната честота. Както е споменато от някои учени, някои най-високи хармонични на спектъра на реакция, изследвани чрез H/V техниката не са надеждни (*Lacave,* 1999). Добра корелация между спектрите на реакция за едно и също място, получено чрез няколко различни метода се получава само за фундаменталната честота на сайта (*Bard,* 1994).

Техниката H/V е разработена от създателя си, като свързва проучвания на сондажи заедно с анализ на записите за силни движения и това е направено за различни геоложки условия. При разработката на тази методика е направена хипотезата, че вертикалата компонента на случайния шум върху земната повърхност запазва характеристиките на основната скала, влияе се относително от вълната на Релей през седиментите и следователно може да се използва за отстраняване както на ефектите на Релей вълната, така и тези на източника от хоризонталната компонента.

Тази техника позволява ефективно да се идентифицира основната резонансна честота на седиментния слой с предполагаем фактор на усилване, като оценките на тези величини са по-реалистични от тези, получени от съотношенията от записите върху седимент спрямо тези върху основна скала. Показано е от много изследователи (Lermo § Chavez-Garcia, 1993; Field and Jacob, 1995) как това H/V съотношение на шума може да се използва за идентифициране на основната резонансна честота и коефициент на усилване на седиментите.

Разглеждайки примерите в изследването на Nogoshi and Igarashi (1971), които сравняват H/V съотношението на Релей вълна с това на микросеизми, може да се заключи, че микросеизмите са съставени предимно от вълни на Релей. По този начин някои от теоретичните изследвания (Lachet and Bard, 1994;

Konno and Ohmachi, 1998; Bard, 1999) предполагат, че пикът на H/V съотношението може да се обясни с основните честоти (моди) на Релей вълните. Ако смятаме, че този подход е верен, трябва да се счита, че микросеизмите се състоят само от Релеева вълна. От друга страна, ако се проверят примери, дадени за Nogoshi и Igarashi (1971), може ясно да видим, че при пиковата честота на H/V съотношението на Релей вълната, нейната енергия е много малка, почти нула.

Имайки предвид основата на H/V техниката е естествено, че характеристиките на H/V спектралното съотношение са валидни не само при микросеизмите, но и при запис на земетресение. Това може да се обясни с характеристиките на средата, като в оригиналната статия на Nakamura (1989) се посочва, че H/V спектралните съотношения от записи на земетресението са почти подобни на спектрите на усилване от микросеизми. H/V спектралните съотношения на микросеизми и земетресения са сходни помежду си и най-вече сходни по спектъра на усилване (Sato et al., 2004). Можем да заключим, че този връх на спектралното съотношение H/V се причинява от множеството отражения на S вълните. Оттам идва и акронима QTS, Quasi Transfer Spectrum. Съществува връзка между дълбочината до основната скала h, скоростта на напречните вълни C_s и фундаменталната честота F_0.

$$F_0 = C_s/(4h) \tag{2.7}$$

Коефициентът на усилване A за фундаменталната честота е свързан с импедансното съотношение. Ако имаме скоростите на подложката V_s и повърхностния слой C_s, тогава

$$A_0 = V_s/C_s \tag{2.8}$$

а дълбочината до подложката h ще бъде

$$h = \frac{V_s}{4.F_0} \tag{2.9}$$

където, V_s е скоростта на S вълната на подложката.

3 Разработване на устройство за цифров запис на микросеизмичен шум – Ambient Noise Accelerometer (ANA).

3.1 Необходимост от разработване на устройство за запис на микросеизмичен шум

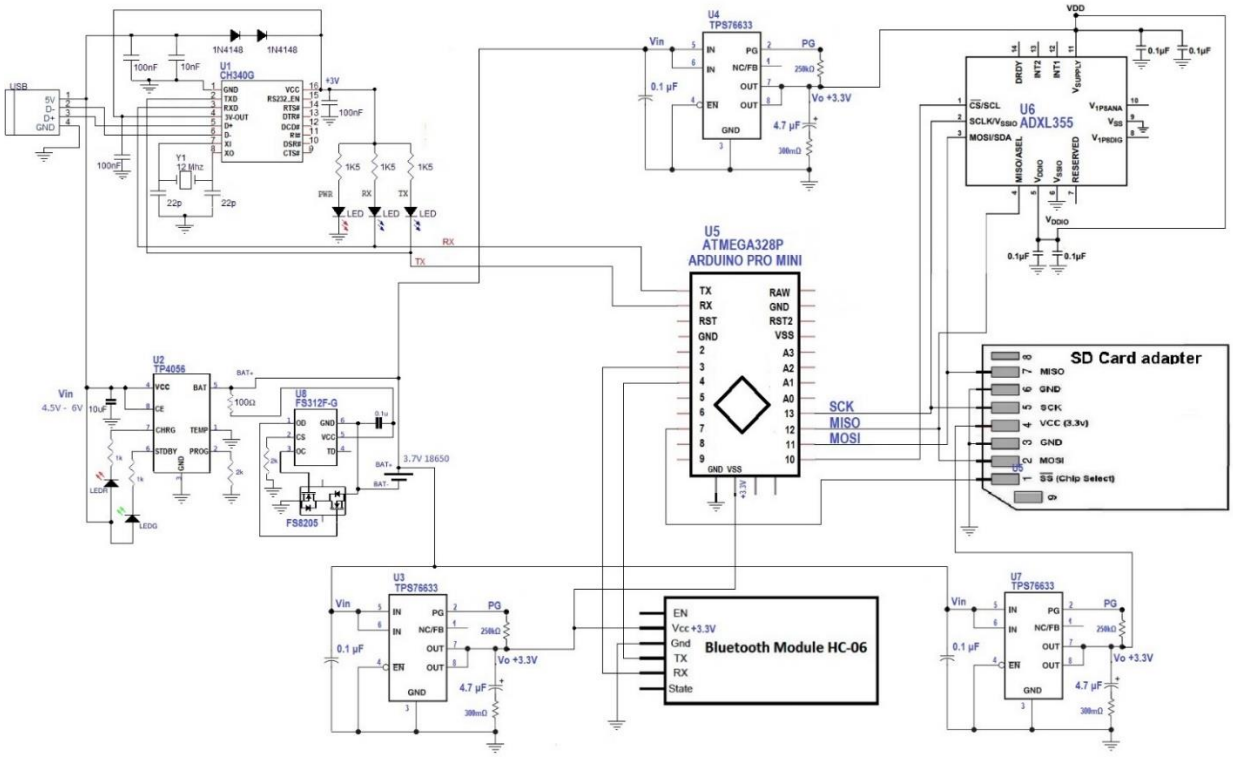
Необходимостта от съвременна, лесно използваема и бърза за работа система, която да не е много скъпа и чрез която да се извършват цифрови записи с достатъчно голяма точност е една от главните причини за разработването на устройството за цифров запис на микросеизмичен шум, Ambient Noise Accelerometer (ANA). Системата е изградена с иновативни електронни компонентни, включващи безжична връзка, сензор за измерване, микроконтролер, подходящ захранващ блок, изграден с три регулатора на напрежение.

Новата система ANA решава един от проблемите, свързан с използването на наличната апаратура GBV-316, а именно дългото време, необходимо за прехвърляне на направените записи с GBV. В разработената от докторанта система ANA е включена и карта с памет, върху която директно се записват данните от сензора. По този начин на картата с памет се съхраняват направените записи, като лесно и бързо се прехвърлят на компютър за последваща обработка и анализ на фундаменталната честота. Ниската консумация на ток в режим на измерване разширява възможността да се извършват много и непрекъснати записи, един след друг с голяма продължителност, ако е необходимо.

Важен фактор при разработката на новата система ANA е и многократно по-ниската и цена от повечето предлагани на пазара аналогични апаратури. Системата е конфигурирана да записва данните от сензора в точно определен файлов формат ***.SAF**. Този формат е необходим за последващото прилагане на софтуера за анализ J-SESAME.

3.2 Схема на безжично мобилно устройството за цифров запис на микросеизмичен шум (ANA)

Принципната схема на разработеното устройство (ANA) е представена на Фиг.3.1 и е базирано на 24-bit акселерометър ADXL355z - U6 [1, 2, 3]. Основните електронни модули, от които се състои са: микроконтролер ATMEGA328P - U5, [7]**,** Bluetooth модул HC-06, SD карта с памет, преобразувател от USB сериен интерфейс към сериен интерфейс RS232. Схемата за зареждане на литиево-йонна батерия е изградена с интегралната схема TP4056 [4]. Напрежението, чрез което тя се зарежда от USB порта на компютъра, е 5 V. Батерията може да бъде заредена и чрез друг външен източник като мобилно зарядно. По време на зареждането е възможно също да се визуализират в реално време данните от сензора. По този начин използваме един USB порт едновременно за зареждане на литиево-йонната батерия и за представяне на данните от сензора в реално време на персонален компютър. Безжичният модул се използва, за да се настроят от разстояние основните параметри, необходими преди да бъде извършен запис. Безжичната връзка значително улеснява работата с устройството, защото не изисква постоянна връзка чрез кабел с компютър, което го прави мобилно и независимо.



Фиг.3.1 Схема на устройството (ANA) за запис на микросеизмичен шум.

3.2.1 Общи принципи на работа на системата

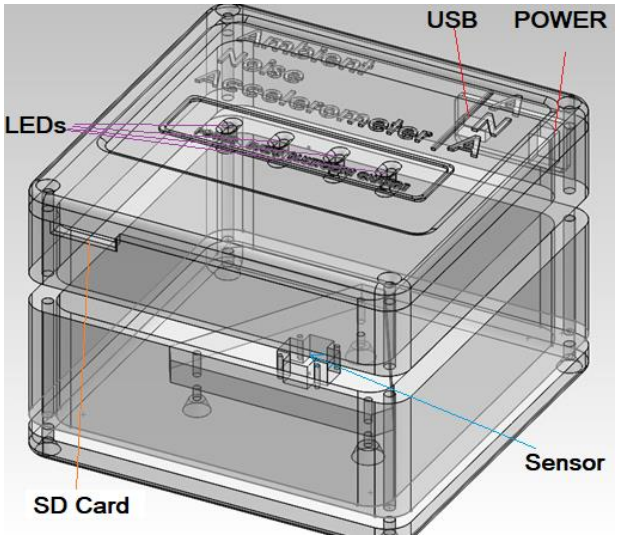
Микропроцесорната безжична система е свързана и работи по следния начин. Сензорът ADXL355z е свързан към микропроцесор ATMEGA328P**,** който осъществява комуникацията между отделните модули. Предаването на информация между микроконтролера и сензора се осъществява чрез сериен SPI интерфейс като комуникацията между тях е двупосочна. Първо, преди стартиране на измерването микроконтролерът конфигурира ADXL355z като записва стойности в съответните регистри. Информацията от измерване на ускорението се предава обратно към микроконтролера по същия интерфейс. Получените данни от микроконтролера се преобразуват в подходящ вид и се предават през сериен SPI интерфейс към SD карта, където се съхраняват.

За реализирането на потребителския интерфейс, чрез който се настройват основните параметри на измервателната система се използва софтуерът **HyperTerminal**, който е инсталиран на смартфон. Чрез него потребителят задава необходимите стойности за извършване на измерването, които са: обхват на измерването (RANGE), продължителност на записа (RECORD TIME), праг на сработване за всяка от трите оси X, Y, Z, (threshold X), (threshold Y), (threshold Z). След това се задават стойности за цифровия нискочестотен "configuring a LPF", и високочестотен "configuring a HPF" филтър. Връзката между мобилното устройство и измерителната система се осъществява чрез безжичен **bluetooth** интерфейс, като по този начин е постигнато галванично разделяне между управляващото устройство за въвеждане на данни и измерителната система. За целта е използван модул HC-06, който се характеризира с изключително ниска консумация, което го прави подходящ за преносими системи с батерийно захранване. Безжичният модул предава данните към микроконтролера ATMEGA328P чрез сериен асинхронен интерфейс, като скоростта на предаване на данните е 57600bps. След приемане на данните от смартфона, микроконтролерът ги преобразува в подходящ вид и ги изпраща чрез сериен SPI към сензора ADXL355z. Тези стойности се записват в съответните регистри, като по този начин се извършва първоначална конфигурация на сензора, след която се стартира измерването. След приключване на измерването сензорът изпраща резултатите обратно към микроконтролера, където те се обработват и записват в SD карта. За осъществяване на комуникацията между SD картата памет и микроконтролера се използва сериен SPI интерфейс със скорост на предаване на данните 115200bsp по същата комуникационна шина. С цел осигуряване на по-голяма гъвкавост на системата, допълнително е предвидена възможност за връзка с персонален компютър чрез USB кабел. За тази цел се използва модул с интегрална схема CH340**,** който е преобразувател от USB към двупроводен асинхронен UART интерфейс. USB портът на компютъра се използва за захранване на интегралната схема TP4056 и едновременно за прехвърляне на данните за ускорението на компютъра в реално. Използването на 5 V от USB порта осигурява необходимото входно напрежение за схемата TP4056, което трябва да е в границите от 4.5 V до 6 V. Изходното напрежение, което се подава към батерията е 4.2 V, а токът може да бъде регулиран и външно чрез промяна стойността на резистора 100 Ω. Данните, прехвърляни през USB порта могат да бъдат представени в графичен вид на PC в реално време.

3.3 Разработване на хардуерната част (кутията) за електронните компоненти на ANA.

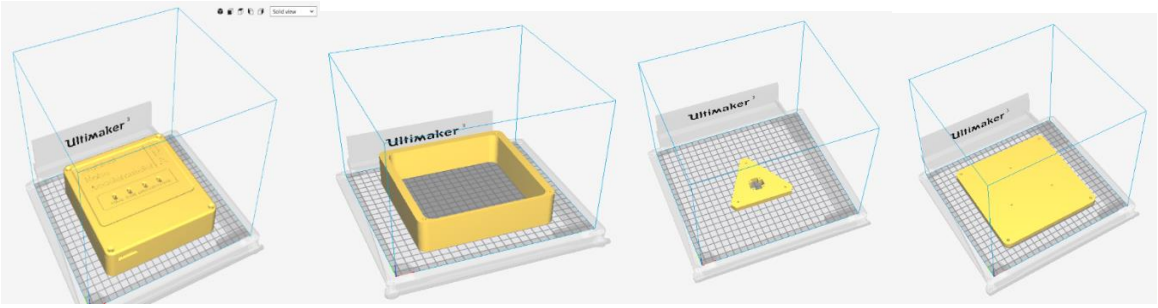
При разработването на кутията за устройството се използва софтуерът SOLIDWORKS, като готовата и завършена конструкция на кутия е представена в 3D изглед на Фиг.3.2. Самата кутия е разделена на четири части, като всяка е създадена отделно. Поставянето на сензора за измерване на правилното място в кутията е от голямо значение, за да бъде регистриран възможно по-добре случайния микросеизмичният шум и в записа да попадне възможно най-малко неполезен шум (под неполезен се разбира шум, изкуствено създаден, с ясен произход).

Важно е позиционирането на елементите в кутията, за да се минимизират собствените колебания на корпуса. При създаването на ANA, сензорът е закрепен максимално ниско и на отделна основа, контактуваща само в три точки с общата основа на кутията. Геометричният център на основата може да бъде получен от пресечната точка на диагоналите и. Позиционирането на триосевата конструкция на сензора за измерване е направено спрямо този център. Сензорът е разположен така, че да се намира максимално близо до центъра на масата на основната конструкция. Бутонът за включване/изключване и USB порта са поместени в задната част на корпуса, както е показано на Фиг.3.2.



Фиг.3.2 Триизмерен план на корпуса на Ambient Noise Accelerometer (ANA)

За изработването на кутията е използван 3d принтер Ultimaker 3, като материалът, от който е изработена кутията е Polylactic acid (PLA). Полимлечната киселина, известна още като полилактид (PLA) [5,6] е термопластичен алифатен полиестер, получен от възобновяеми ресурси като царевично нишесте, корени от тапиока, чипс или нишесте, или захарна тръстика. Материалът се използва предимно в 3D индустрията, тъй като е икономически изгоден и се произвежда от възобновяеми ресурси. **PLA има втория най-голям обем на консумация от всички биопласмаси в света.** Чрез използването на 3D принтер е изработен целия корпус на устройството. На Фиг.3.3 в отделни илюстрации са представени основните елементите на кутията в процес на подготовка, т.е. преди изработването им.



a) b) c) d)

Фиг.3.3 Подготовка за изработване на основните елементи на ANA, представени чрез софтуера за 3d дизайн CURA

Изработването на кутията се извършва на няколко етапа – проектиране, симулиране и създаване на елемента. Проектирането на корпусната конструкция е извършено в един проект, след което за изработването му е разделен на четири основни части. На Фиг.3.3 са представени четирите части на устройството, а на Фиг.3.3d - основата, на която са закрепени всички части. Триосевата конструкция, в която е поместен сензорът за измерване е представена на Фиг.3.3b, средната част, в която се намира електрониката - на Фиг.3.3b, четвъртата част, намираща се най-отгоре, панелът на устройството - на Фиг.3.3a. За да се елиминират грешки и несъответствия, които могат да възникнат при сглобяването, цялата кутия е проектирана в един детайл, след което той е разделен на няколко отделни. Това се прави когато един детайл е прекалено голям и не може да бъде изработен наведнъж.

3.4 Характеристики на устройството за запис Ambient Noise Accelerometer (ANA)

В Таблица 2 е представена пълната информация за ANA.

Таблица 2. Характеристики на микропроцесорната система ANA

ИМЕ	**Ambient Noise Accelerometer - ANA**
Максимална честота на цифроване за 1s	380
Аналогово-Цифров преобразовател	24-bit
Карта с памет	2GB -16GB
Продължителност на един запис	1 - 900s
Безжичен модул за комуникация и настройка	HC-06
Консумация на ток в режим на измерване	22mA
Консумация на ток в режим на изчакване	21µA
Интерфейс за връзка	SPI
Формат на създаваните записи	*.SAF
Плътност на шума за всички оси	20 µg/√Hz
Плътност на шум при обхват ±2 g за трите оси	25µg/√Hz
Чувствителност на осите при обхвати; ±2 g ±4 g ±8 g	 256,000 LSB/g 128,000 LSB/g 64,000 LSB/g

Мащабиращ фактор за трите оси ±2 g ±4 g ±8 g	 3.9 μg/LSB 7.8 μg/LSB 15.6 μg/LSB
Горна граница на високочестотния филтър	1 - 1000 Hz
Долна граница на нискочестотния филтър	0.0095 – 10 Hz
Тип Батерия	3.7V 18650 li-ion 2200mAh
Време между два записа	200ms

4. Експериментална част

4.1 Анализ на направените записи на случаен сеизмичен шум в западната част на град Пловдив и интерпретация на резултатите

Както беше споменато във въведението, при изследването и оценката на сеизмичния хазарт в определена точка трябва да бъдат разгледани три елемента: общата сеизмичност, която би въздействала върху точката; законите на затихване на сеизмичните вълни и въздействието на локалните условия на точката (геоложката структура под точката) върху бъдещо сеизмично въздействие. Първите два елемента са добре изучени за България, като те са и основните, които се имат предвид при извършване на национално сеизмично райониране (последното такова за Българи е завършено през 2008 г.).

При националното райониране третият елемент на оценка на сеизмичната опасност, локалните условия, се счита за константен за големи региони от страната. За целия град Пловдив, например, локалните условия се считат едни и същи. От друга стана разпределението на макросеизмичната интензивност (пораженията) за града след силните земетресения до Чирпан и Пловдив през 1928 г. показва вариации от 7-ма до 11-та степен по скалата на Медведев-Шпонхойер-Карник. Тези резултати демонстрират, че влиянието на локалните условия върху сеизмичното въздействие в Пловдив е голямо.

Приемането на локалните условия за константни има два основни недостатъка. Ако влиянието на локалните условия в определени зони се подцени, то има вероятност в тези зони постройките да не отговарят на очакваното сеизмично въздействие, което би довело до значително увеличаване на последствията от земетресения. В обратния случай, при надценяване на локалните условия в дадени райони, стойността на сградите в тези райони ще е неоснователно силно завишена.

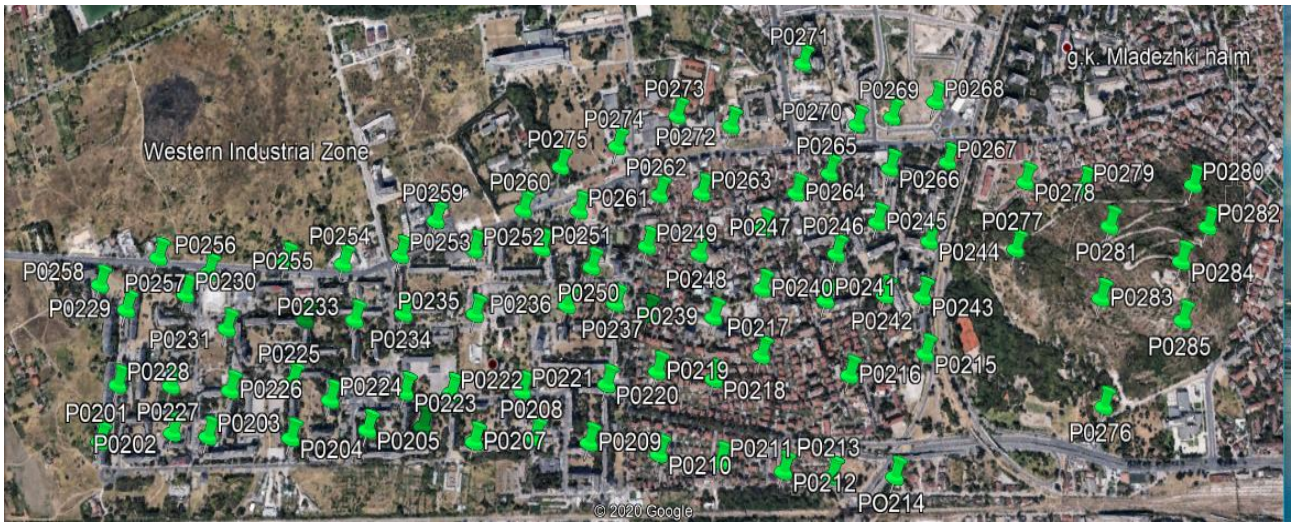
Решение на тези проблеми дава така нареченото микросеизмично райониране. При него първите два елемента от оценката на сеизмичния хазарт остават същите, но влиянието на третия елемент се отчита, като се взема предвид вариацията на локалните условия за конкретен регион. Такова микросеизмично райониране за България е извършено за София и Русе, като за Пловдив е започнато събиране на необходимата база-данни. Извършването на микросеизмично райониране за Пловдив изисква натрупване на пълна информация за локалните условия в града, включваща фундаменталната честота на реакция за различните точки, вариациите на дълбочината до основната скала, скоростта на напречните сеизмични вълни и други.

Имено това определя и значението на използвания в дисертацията метод на H/V спектрално съотношение, който позволява определянето на част от горните параметри и натрупване на база данни за тях по един недеструктивен, бърз и евтин начин в сравнение със стандартните сондажни методи. Важен принос

на дисертацията е, че част резултатите от нея директно влизат в базата данни за бъдещо микросеизмично райониране на Пловдив.

4.2 Определяне на точки за анализ и създаване на база данни със записи на случаен сеизмичен шум за западната част на град Пловдив

Избраните места за научното изследване се намират в гр. Пловдив кв. „Христо Смирненски“. Една от причините в дисертацията да бъде избран точно този район от града е, че до момента той не е изследван чрез H/V метода, както и че през последните три-четири години в него се наблюдава значително застрояване на жилищни постройки с височина над 5 етажа. За строителния план на гр. Пловдив се предвижда кварталът да се разрасне на север, достигайки до “Гребна база“. Това са едни от основните причини, поради които бе създаден план за работа в точно този квартал. Избраните места образуват мрежата от точки, в които са извършени записи на микросеизмичния шум. Всяка маркирана точка е разположена на около 150 м от останалите, като предварителното избиране на точки, в които да се извършат записи, е свързано с определени трудности. За целта е използван софтуера **GoogleMap**. Той дава възможност ориентировъчно да определим и предвидим всички места за изследване, без да е необходимо предварително обхождане. Предварителната информация, която ни е необходима за конструирането на мрежата от точки, са точни координати на поставения маркер и надморска височина. Изследването с помощта на H/V метода в населени места, е свързано с определени трудности, породени от: гъстотата на застрояване; непрекъснатия шум от транспорт; преминаващи хора и др. изкуствени източници. Ето защо финалния избор на точките за запис може да бъде направен само на терен. Освен точните координати на точките ,на място (в протоколния дневник), се записват още надморска височина, температура на въздуха, повърхността, върху която са извършени записите. Други събития, които не можем да предвидим, но биха оказали значително влияние в микросеизмичния запис, се отбелязват на място, като например наличието на строителен обект, преминаващ влак, или др. тежка техника. Избраните места за измерване са 85 на брой, в които се извършват по три записа с продължителност 600 s. Всички отбелязани маркери на картата са местата, в които сме извършили запис и всяко място е маркирано с номер, започващ от P0200 до P0285. Номериране на местата от мрежата с точки цели по-лесно да се следва създаденият план за извършване на записи на микросеизмичния шум. На следващата Фиг.4.1 е представена картата на квартал „Хр. Смирненски“, върху която със зелени маркери са отбелязани местата, в които са извършени по три записа.



Фиг.4.1 Карта на гр. Пловдив, кв. „Христо Смирненски“, на която са маркирани местата, в които са извършени записи на микросеизмичен шум.

4.3 Характеристики и използване на велосиметър GBV-316

Основната група записи на случаен сеизмичен шум, анализирани в дисертационния труд, са направени с помощта на преносима сеизмична станция GeoSIG GBV-316 поради факта, че завършването на разработеното устройство ANA стана в един по-късен етап. GBV-316 е била многократно използвана за записи на шум при използване на HVSR метода (Kandilarov, 2005; Kandilarov et al., 2009). Този тип станция се използва широко и в проекта SESAME след тестове, направени по време на семинар в Института на Физика на твърдата Земя, Университета в Берген като част от същия проект. Инструментът е бил тестван и сравнен с няколко други инструменти, сред които широколентов сензор и е установено, че е напълно надежден и подходящ за сеизмични измервания на шума и последващ анализ на H/V спектрални съотношения (Atakan, 2002). Параметрите на **GeoSIG GBV-316** са дадени в *Таблица 3.*

Таблица 3. - Технически спецификации на системата за събиране на данни GBV-316 сеизмична станция (Asi, 2000; Havskov § Alguacil, 2004).

GBV-316 Цифров Регистратор	Характеристики
Динамичен обхват	[0.0015 % при пълен обхват]
Разделителна способност	16 Bit
Честота на цифроване	25, 50, 100, 200 SPS / Hz
Вградена памет / допълнителна памет	16 MB (от 32 до 64 MB)
Батерия	12 VDC, 6.5 Ah / 2 дни

Системата GBV-316 използва шестнадесет битова система за събиране на данни. Тъй като е използвана многократно и се оказва подходяща за запис на случаен сеизмичен шум, считаме за необходимо да я опишем накратко. Снимка на инструмента е показана на Фиг.4.2.

Фиг.4.2 Велосиметър GBV-316

GBV-316 е трикомпонентна система за събиране на данни, оборудвана със шестнадесет битов дигитайзер. Той има вътрешен предварителен усилвател, който позволява входящият сигнал да бъде усилен 2.2, 10, 100 или 1000 пъти.

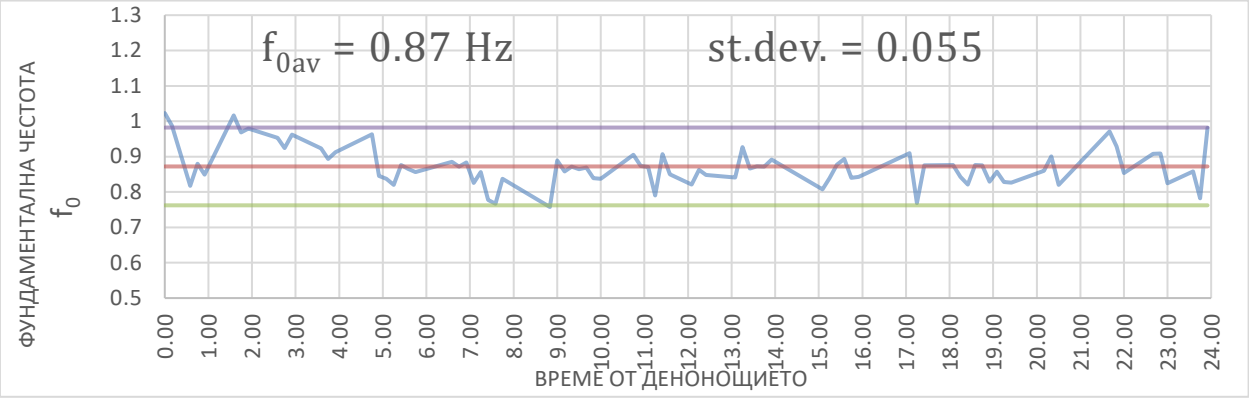
4.4 Денонощни вариации и надеждност на определената стойност на f_0

В дисертацията бе направен и денонощен анализ на фундаменталната честота с цел установяване на вариации на $\mathbf{f_0}$ за различните часове от денонощието. Това е един от основите критерии за надеждност на резултатите от анализа. Имайки предвид важността на този параметър и необходимостта от правилната му интерпретация, извършихме поредица от записи на сеизмичен шум в една и съща точка, използвайки GBV-316. На Фиг.4.3 е представено мястото на извършване на записите. Всички те се извършват през интервал от 30 min на всеки час, след което се анализират и получените стойности от часовия интервал за $\mathbf{f_0}$ са представени в *Таблица 4*, като графика на вариациите и отклонението от средната стойност са дадени на Фиг.4.4.

Фиг.4.3 Със зелен маркер е отбелязано мястото, в което е извършен 24 часовият разпис на микросеизмичния шум. На картата са отбелязани също и трите по големи завода

Таблица 4. Получени резултати за f_0 през различни часове от денонощието

Време на записа	f_0	Време на записа	f_0	Време на записа	f_0	Време на записа	f_0	Време на записа	f_0	Време на записа	f_0	Време на записа	f_0
0.00	1.02	3.75	0.89	7.08	0.83	10.00	0.84	13.42	0.87	17.42	0.87	20.55	0.92
0.17	0.99	3.92	0.91	7.25	0.86	10.75	0.90	13.58	0.87	18.08	0.88	21.05	0.9
0.58	0.82	4.75	0.96	7.42	0.78	10.59	0.87	13.75	0.87	18.25	0.84	21.40	0.97
0.75	0.88	4.92	0.85	7.58	0.77	11.08	0.87	13.92	0.89	18.42	0.82	21.50	0.93
0.92	0.85	5.08	0.84	8.83	0.76	11.42	0.91	15.25	0.84	18.75	0.87	22.00	0.85
1.58	1.02	5.25	0.82	9.00	0.89	11.58	0.85	15.42	0.88	18.92	0.83	22.40	0.9
1.92	0.98	5.58	0.87	9.17	0.86	12.08	0.82	15.58	0.89	19.08	0.86	22.50	0.9
2.58	0.95	5.75	0.86	9.33	0.87	12.25	0.86	15.75	0.84	19.25	0.83	23.00	0.8
2.75	0.92	6.58	0.89	9.50	0.86	12.42	0.85	15.92	0.84	19.42	0.83	23.35	0.85
2.92	0.96	6.75	0.87	9.67	0.87	13.08	0.84	17.08	0.91	20.17	0.86	23.45	0.68
3.58	0.92	6.92	0.88	9.83	0.84	13.25	0.93	17.25	0.77	20.33	0.90	23.55	0.98

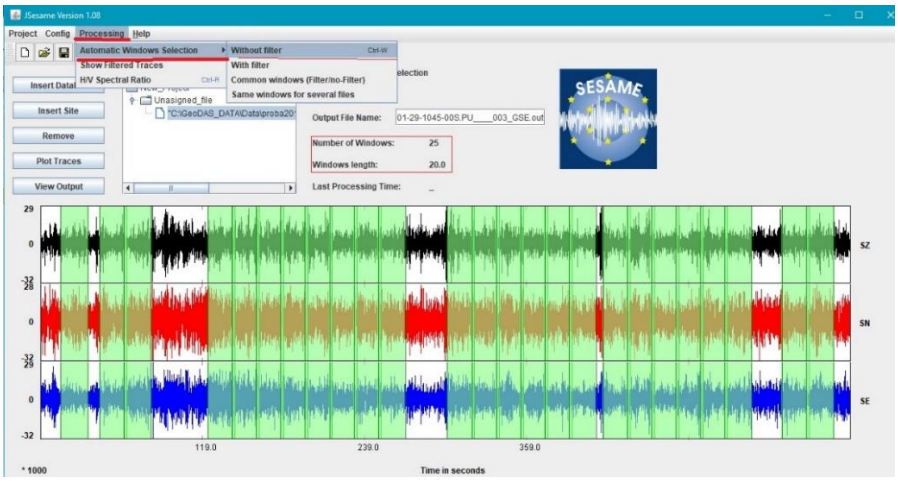


Фиг.4.4 Вариации на $\mathbf{f_0}$ за период от 24 часа.

Може да заключим, че часовият интервал оказва минимално влияние в крайния резултат за фундаменталната честота $\mathbf{f_0}$.

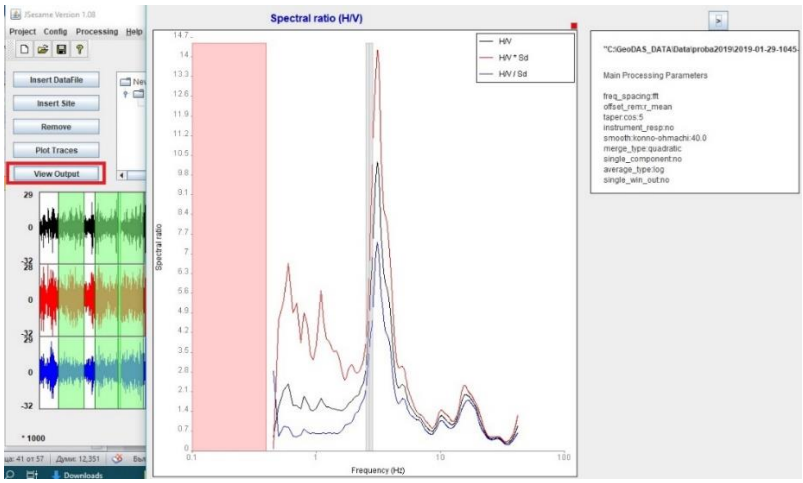
4.5. Анализ от направен запис и намиране на фундаменталната честота f_0 чрез софтуера *J-SESAME*

Софтуерът за обработка и анализ на ***_GSE** файлове е J-SESAME [8-10], показан на Фиг.4.5. Програмата анализира само тези маркирани участъци, тъй като те съдържат случайния шум. Всички други немаркирани шумове от записа са с високи амплитудни пикове и техния произход е ясен. При H/V метода това е неполезен шум, причинен изкуствено от транспорт или друг източник, на който е ясен произходът. Анализирането на тези големи пикове водят до голяма грешка при интерпретирането и достоверността на резултатите.



Фиг.4.5 Автоматично селектиране на необходимия брой прозорци чрез Windows Selection

Последната стъпка, след като са селектирани необходимия брой участъци от време, е чрез командата H/V Spectral Radio софтуерът да направи спектралния анализ, за да намери $\mathbf{f_0}$ за съответната точка. Командата се извършва в следната последователност - отново от менюто Processing се избира опция H/V Spectral Radio. След анализа програмата дава съобщение за завършване на процедурата. За да бъдат видени резултатите в графичен вид е необходимо да се маркира записът и да се приложи опцията на софтуера View Output, чрез която се визуализира графично анализът на Фиг.4.6. От анализа на представената графика ясно се виждат три криви – червена, черна и синя, като с черен цвят е представена амплитудата на спектралното отношение на H/V. Максималната стойност на това съотношение определя фундаменталната честота f_0 . Линиите в син и червен цвят дават изчисленото спектрално съотношение +/– едно стандартно отклонение. Розовата част е честотен диапазон, за който не може да се определи спектрално съотношение.



Фиг.4.6 Графика от анализа на микросеизмичен шум. Пикът определя фундаменталната честота

Точната стойност на фундаменталната честота се записва от програмата във отделен текстови файл, като в него е дадено и спектралното отношение за всяка честотна стойност. J-SESAME запазва резултатите от анализа на всеки запис в папка, която се създава в самото началото. По този начин всички резултати от анализите, включително точната фундаментална честота, се запазват в една и съща папка. В случай, когато в папката го няма резултатът от анализа, това най-често се дължи на грешка в името на файла (*оставено разстояние между символите или друга грешка)*. Ако анализът е успешен, папката за изходни данни ще съдържа файла **2019-01-29-1045-00S.PU____003_GSE.out**. Може да се отбележи, че анализираният изходен файл има допълнително поставено разширение *.**out**, което се създава от J-SESAME след успешно извършен анализ на записа. Резултатите от анализа на примерния файл, записан в папка, изглеждат по следния начин и е даден по-долу.

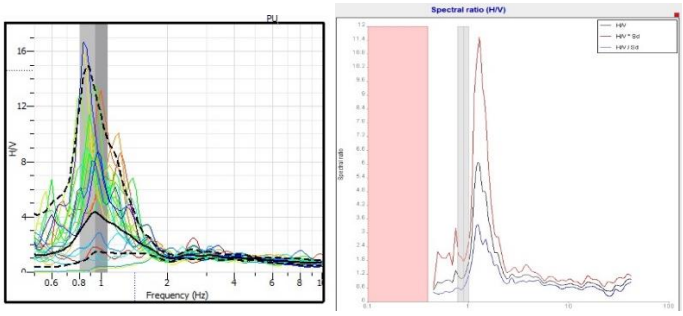
```
#-----------------------------
 # n_windows:     25
 # window_len:     20.000
 # labels:  m/s          SZ          SN
 # n_freq_samples:    835  Fo:    2.7821 range +/- 1 s.d.:    2.6270 -    2.9464 [Hz]
 #    freq          av_HV          ns_HV          ew_HV       av_HV_logstd    ns_HV_logstd    ew_HV_logstd
   0.4997502E-01    2.153896       2.949792       0.1751433       2.636071       2.736608       4.481180
   0.9995003E-01    1.868616       2.537121       0.2279796       4.638472       4.743550       5.183136
   0.1499251        1.559759       2.107925       0.1604865       2.983783       3.044924       3.935240
   0.1999001        2.166829       3.003478       0.1514398       2.467527       2.502854       5.053236
   0.2498751        2.383583       3.174212       0.1712994       2.798105       2.936565       4.573781
```

Във файла се съдържат още честотата на цифроване, **# n_freq_samples: 835**; минималната, максималната и средна стойност за изчислената **f_0 (средната стойност +/- 2.7821 range +/- 1 s.d.**: **2.6270 - 2.9464 [Hz]);** броят анализирани прозорци **# n_windows: 25;** продължителността на времето за анализ на всеки прозорец **# window_len: 20.00 s** и мерната единица **# labels: m/s** .

4.6 Анализ на направените записи и получени резултати за фундаменталната честота в кв. „Христо Смирненски“ на гр. Пловдив

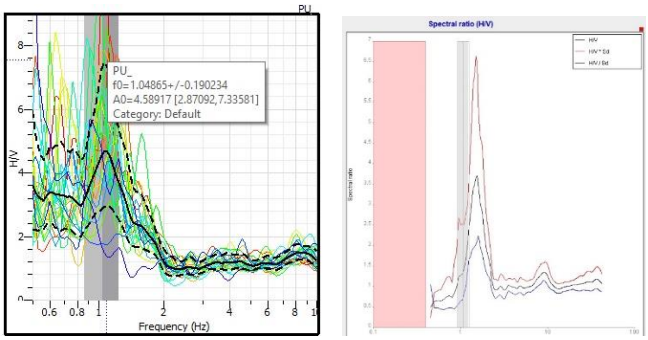
Всички получени резултати от анализа за измерената f_0 от всички точки са представени в *Таблица 5*. Тя съдържа също информация за усилването A_0 и дълбочината до основната скала. Номерът на всяка точка от таблицата отговаря на съответния маркер от мрежата с точки, представена на Фиг.4.1. В таблицата са нанесени; средната стойност на фундаменталната честота f_0 от трите записа, средна стойност на усилването A_0 и дълбочина до основната скала за изследвания район.

Част от резултатите от извършените анализи в няколко места с получената f_0 чрез двата софтуера за обработка, **Geopsy** и **JSESAME**, бяха представени на “9-та Национална конференция по геофизика**.**



a) b)

Фиг.4.7 Резултатите от измерената f_0 в точката P0201, представени с двата софтуера за обработка a) Geopsy, 0.93Hz; b) JSesame, 0.96Hz.



a) b)

Фиг.4.8 Получената f_0 за точката P0209, представена от два софтуера.
a) Geopsy, 1.05Hz; b) JSesame.1.08Hz

На Фиг.4.7, и Фиг.4.8, са показани резултатите от анализа на записите в няколко характерни точки от мрежата, показана на Фиг.4.4. Тези точки бяга избрани за да се провери до колко изборът на обработващ софтуер (Geopsy или JSESAME) може да доведе до вариация на получената фундаментална честота в конкретна точка**.** Получените стойности за f_0 чрез използването на двата различни софтуера са близки за всяка една точка. Това показва, че изборът на софтуер за анализ не е от съществено значение. И двата софтуера са подходящи за прилагане на H/V метода и имат своите предимства и недостатъци. Изборът на JSesame за обработващ софтуер на записите от всичките 85 точки бе направен основно поради факта че записите от микропроцесорната система ANA са във *.SAF формат, който е подходящ за анализ от JSesame.

Записът от всяка една точка беше анализиран и са получени фигури, подобни на Фиг.4.7, и Фиг.4.8 . По такъв начин е определена фундаменталната честота за всяка една точка. Всъщност най-точно фундаменталната честота е представена в изходящите файлове от анализа за всяка точка.

Определените стойности на фундаменталната честота f_0 за всички изследвани точки са представени в таблица 5.

Таблица 5. Получени резултати за f_0 и A_0 за различните точки от изследвания район - кв. „Христо Смирненски“ на гр. Пловдив.

№ на точката	f_0	A_0 (средна стойност	Разстояние до скалната подложка (m)

		от 3те записа)	$h=V_S/4.f_0$
POINT-P0201	0.944	5	26.4
POINT-P0202	1.171	3.8	33.7
POINT-P0203	0.336	6.8	65.6
POINT-P0204	0.278	8	67.4
POINT-P0205	1.101	3.5	38.9
POINT-P0206	1.014	5.4	27.3
POINT-P0207	1.033	5.8	25.1
POINT-P0208	1.066	5.5	25.5
POINT-P0209	1.082	4.4	25.4
POINT-P0210	1.131	4.2	31.5
POINT-P0211	1.237	4.7	25.8
POINT-P0212	1.248	6.8	17.6
POINT-P0213	1.281	6.5	18
POINT-P0214	1.354	6.6	16.7
POINT-P0215	2.075	6.7	11.8
POINT-P0216	1.565	9.2	10.4
POINT-P0217	1.484	6.8	14.8
POINT-P0218	1.305	5.7	20.1
POINT-P0219	1.103	5.1	26.6
POINT-P0220	1.154	4.6	28.2
POINT-P0221	1.061	5.3	26.6
POINT-P0222	1.053	6.2	22.9
POINT-P0223	1.093	4.8	28.5
POINT-P0224	0.958	4.5	34.7
POINT-P0225	1.013	3.6	41.1
POINT-P0226	0.938	6.1	26.2
POINT-P0227	0.971	5.8	26.6
POINT-P0228	0.984	5.7	26.7
POINT-P0229	1.004	4.7	31.7
POINT-P0230	0.936	5.4	29.6
POINT-P0231	0.996	5	30.1
POINT-P0232	1.035	5.6	25.8
POINT-P0233	1.019	5.1	28.8
POINT-P0234	1.002	6	24.9
POINT-P0235	0.986	5.1	26.8
POINT-P0236	0.513	7.8	37.4
POINT-P0237	1.151	6.2	21.1
POINT-P0238	1.275	5.8	20.2
POINT-P0239	1.366	5.7	19.2
POINT-P0240	1.653	6.3	14.4

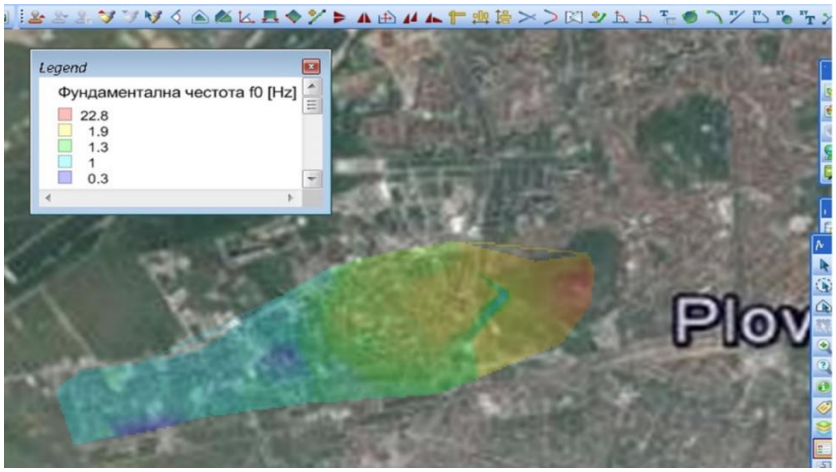
POINT-P0241	1.774	7.7	10.9
POINT-P0242	2.156	5.7	12.2
POINT-P0243	2.352	3.8	16.7
POINT-P0244	6.078	5.3	4.6
POINT-P0245	2.451	5.4	11.3
POINT-P0246	2.034	7.4	9.9
POINT-P0247	1.708	6.5	13.5
POINT-P0248	1.685	5.5	16.2
POINT-P0249	1.271	4.9	24.1
POINT-P0250	1.144	6.1	21.4
POINT-P0251	1.086	5.7	24.2
POINT-P0252	1.021	5.2	28.2
POINT-P0253	0.927	4.2	38.5
POINT-P0254	0.918	4	40.8
POINT-P0255	0.971	5.2	29.7
POINT-P0256	1.173	4.8	26.6
POINT-P0257	0.944	6	26.4
POINT-P0258	0.934	6.1	26.3
POINT-P0259	0.925	5.1	31.7
POINT-P0260	0.984	6.3	24.2
POINT-P0261	1.004	5.5	27.2
POINT-P0262	1.312	4	28.5
POINT-P0263	1.452	4.9	21.1
POINT-P0264	1.802	5.2	16.
POINT-P0265	1.712	6.3	13.9
POINT-P0266	1.724	6.1	14.2
POINT-P0267	2.031	8.5	8.6
POINT-P0268	1.711	6.4	13.7
POINT-P0269	1.586	6.5	14.5
POINT-P0270	1.627	6.8	13.5
POINT-P0271	1.672	6.2	14.5
POINT-P0272	1.581	5.8	16.3
POINT-P0273	1.041	5.2	27.7
POINT-P0274	1.153	6	21.7
POINT-P0275	1.022	5.8	25.3
POINT-P0276	8.384	6.8	2.6
POINT-P0277	0.881	3.8	44.8
POINT-P0278	8.636	4.5	3.8
POINT-P0279	8.666	4.4	3.9
POINT-P0280	9.8665	3.3	4.60
POINT-P0281	10.2005	4	3.6

POINT-P0282	12.238	4.3	2.8
POINT-P0283	11.231	5	2.7
POINT-P0284	23.068	5	1.3
POINT-P0285	16.495	4	2.2

От резултатите, представени в *Таблица 5*, можем да заключим следното. В по-голямата част от изследвания район измерената $\mathbf{f_0}$ варира в диапазона от 0.4 до 2Hz. Тъй като в тази част релефът е равнинен и горният повърхностен слой е седиментен, считаме за достоверни получените стойности. В другата част от района попада най-високото от шестте тепета на гр. Пловдив, известно още като Младежки хълм. Измерените стойности за $\mathbf{f_0}$ на него варират от 6 до към 23 Hz. Разпределението на фундаменталната честота в целия изследван района е представено на Фиг.4.9. От изчислената дълбочина до основната скала за точките от мрежата се вижда, че доста ясно може да се определи районът, в който се намира тепето. Като се има предвид, че голяма част от него е твърда скала, то определените високи стойности на $\mathbf{f_0}$ добре корелират с малки стойности на дълбочината до основната скала.

Тези резултати потвърждават основната връзка между фундаменталната честота f_0, дълбочината до основната скала h и скоростта на напречните сеизмични вълни V_S (формула 2.9).

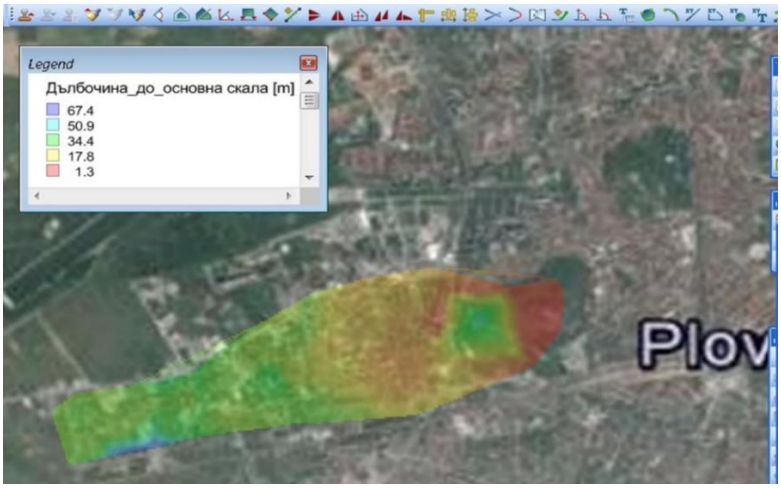
Формулата позволява при известна фундаментална честота в дадена точка и известна скорост на напречните вълни за слоя под нея, да бъде определена дълбочината до основната скала. Най-добри резултати се получават, когато информацията за скоростта на напречните вълни е предварително известна от други геофизични изследвания. При нашия анализ е приета средна скорост от Vs = 600m/s за всички точки.



Фиг.4.9 Резултати за разпределението на фундаменталната честота на точките от записите на случаен сеизмичен шум, картирани в **ГИС**

Изчислената с помощта на формула (2.9) дълбочина до основната скала на тепето варира от 1.3 до около 5 метра. В останалата част от изследвания район дълбочината варира от 14 до около 30 метра, като разпределението на дълбочината в целия район е представено чрез ГИС среда на Фиг.4.10. Получените

резултати от проучването на района, сравнени с резултати получени за Небет Тепе в центъра на гр. Пловдив, (Kandilarov, 2005; Kandilarov et al., 2009), потвърждават, че използваният H/V метод води до определяне на по-високи фундаментални честоти за места с плитка основна скала и по-ниски фундаментални честоти за места с по-дебели седименти. От получените карти с разпределение на фундаменталната честота и дълбочината до основната скала се наблюдава добра корелация между тези два параметъра.

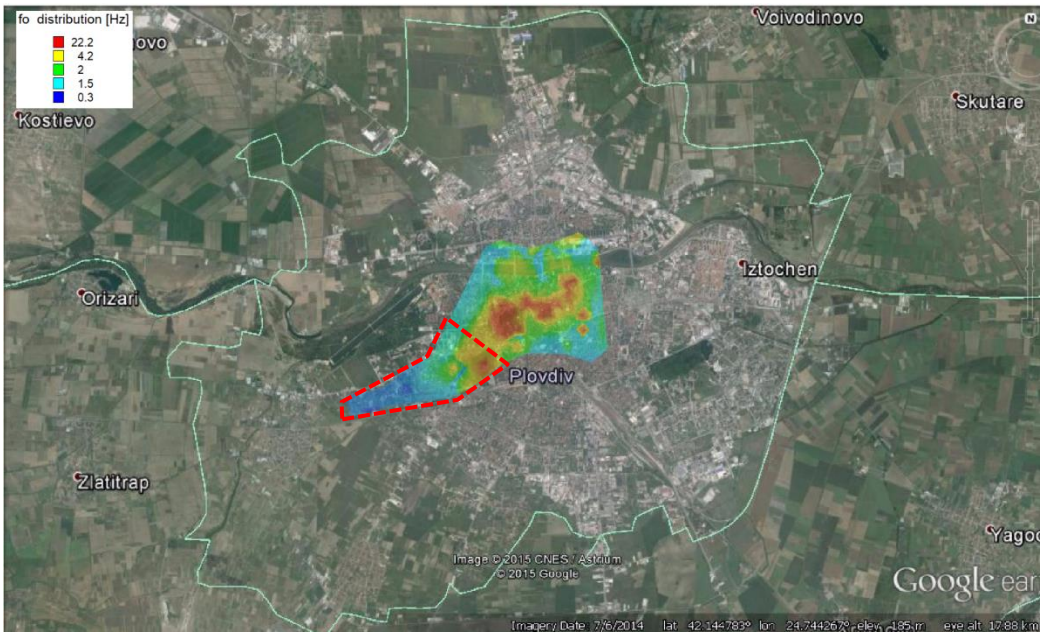


Фиг.4.10 Резултати с разпределението на дълбочината до основната скала в изследвания район кв. „Христо Смирненски“ на гр. Пловдив представена в **m**

4.7 Значение и приложимост на получените резултати

Както беше показано по-горе чрез прилагането на HVSR метода за анализ на случаен микросеизмичен шум, за всички точки, в които бе направен запис, са определени фундаменталните честоти (*Таблица 8*). Значението на получените резултати се определя от следното:

- Получените геофизични характеристики за анализираните точки влизат в база-данни за гр. Пловдив, която е необходима за извършване на бъдещо микросеизмично райониране на града.



Фиг.4.11 Резултати за разпределението на фундаменталната честота на точките от записите на случаен сеизмичен шум за западната част на Пловдив (пунктиран многоъгълник) и зона ‚Център‘, картирани в **ГИС**

- От получените в дисертацията резултати важно значение от научна гледна точка има фактът, че приложимостта на тази (HVSR) методика за определяне на фундаменталната честота в определена точка, бе отново потвърден. Вижда се (Фиг.4.11), че получените стойности за фундаменталните честоти добре опознават районите с по-малка дълбочина до основната скала (по-високи стойности на f_0) и тези с по-голяма дълбочина до основната скала (по-ниски стойности на f_0)
- Тези данни допълват резултати за фундаменталните честоти за друга част от града (център), получени от Kandilarov (2005) и Kandilarov ey al., (2009). На Фиг.4.11 е дадено разпределението на фундаменталните честоти, получено от анализа на записите от тези две бази-данни. Вижда се, че значителна част от гр. Пловдив е все още неизследвана. Това показва необходимостта от подобни изследвания и за останалите райони на града, което е доста времеемка задача и би могло да бъде извършено в рамките на общ проект, включващ както Пловдивски университет „Паисий Хилендарски“, така и общинските институции, свързани със застрояването на града.
- Извършването на изследванията в дисертацията демонстрираха, че HVSR методиката е неразрушителна, евтина и бърза, като изследванията в една точка отнемат 30-40 минути. При стандартния сондажен подход изследването би отнело дни, като едновременно с това е свързано със сондиране (понякога през асфалт, бетон и т.н.) и необходимостта от значителни финанси.

Фиг.4.12 Под-зони А, В и С в разпределението на фундаменталната честота на точките от записите на случаен сеизмичен шум за западната част на Пловдив.

- Освен общата приложимост на получените в дисертацията резултати в бъдеще, те могат да бъдат използвани и директно при вземане на решения от институции, компании и строителни фирми, извършващи проучване на терен преди той да бъде застроен. Информацията може да бъде полезна на община Пловдив при оптимизиране на ПЛАН ЗА ЗАЩИНА НА НАСЕЛЕНИЕТО ПРИ БЕДСТВИЯ И ЗАЩИТА ПРИ ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ, а също така и за АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НА РИСКА ОТ ЗЕМЕТРЕСЕНИЕ. В случая се има предвид едно общо правило, че е добре собствената честота на постройките (съоръженията) и фундаментална честота на мястото, в което те са построени, да са различни с цел избягване на резонансни явления, водещи до увеличаване на сеизмичното въздействие върху постройките и съоръженията. Ако се върнем към разпределението на фундаменталната честота за западната част на Пловдив, резултатите за което са получени в дисертацията (Фиг.4.12), то прави впечатление, че изследваната част може да бъде разделена на три под-зони А, В и С. Под-зона А се характеризира с по-ниски стойности на фундаменталната честота (0.3 ÷ 2 Hz) и по-високи сгради (5 ÷ 15 етажа). За под-зона В преобладават по-ниски сгради (2 ÷ 4 етажа) и са определени по-високи стойности на фундаменталната честота (2 ÷ 10 Hz). Под-зона С е почти незастроена и там са определени най-високите стойности на фундаменталната честота (11 ÷ 23 Hz). Тези резултати могат да бъдат използвани за предварителен анализ на сеизмичната опасност в изследвания район (Западен) на Пловдив. Всъщност най-подходяща за застрояване е под-зона С, за която преобладаващите фундаментални честоти се отличават значително от собствените честоти на сградите и в двете други под-зони А и В. Имайки предвид общото правило, че на по-високите сгради съответстват по-ниски собствени честоти, то застрояването на под-зони А и В е би трябвало да бъде извършено по такъв начин, че в под-зона А да преобладават по-ниски сгради, а в под-зона В да са по-високи сгради. По принцип определянето на собствената честота на сгради е трудна задача (Dikmen § Mirzaoglu, 2005) и затова докторантът счита, че то трябва да се извършва от професионалисти в сферата на

строителството, тъй като оценката зависи не само от етажността на постройката. В този аспект приложимостта на резултатите от дисертацията са във факта, че специалистите в строителството вече имат разпределението на фундаменталните честоти за изследвания район и могат да се съобразят с него.

Заключение

Чрез HVSR методиката са извършени изследвания на някои важни параметри на плитката земна кора, именно (фундаментална честа, скорост на напречните сеизмични вълни и дълбочина до основна скала). За изследване е избран район в гр. Пловдив, кв. Христо Смирненски. Районът се намира в силно сеизмична зона (Маришки шев) и последните силни земетресения в тази зона от 1928 г. са довели до 115 жертви и големи материални щети. Използването на HVSR техниката при направените в дисертацията изследвания позволи още веднъж да се анализират възможностите на тази методика в район, за който има известна предварителна информация. Изпълнението на задачите показа и необходимостта от нова микропроцесорна система за по-бързо и оптимизирано записване на случайния шум, като нейната успешна разработка стана част от работата на докторанта.

Представено е цялостното разработване, проектиране и конструиране на безжичната микропроцесорна система за цифров запис на микросеизмичен шум, Ambient Noise Accelerometer (ANA). Представена е пълната схема на устройството, от какви модули и компоненти се състои и начина по който са свързани. За функционирането на устройството от докторанта е написан програмен код, чрез който в Arduino среда е програмиран микроконтролера. В тази глава е описано още как се осъществяват комуникацията и настройките на устройството чрез безжична връзка посредством използвания Bluetooth модул HC-06. При разработването на устройството, за зареждане на батерията използвах напрежението от USB порта на компютъра. Освен за зареждане, същият USB порт може да се използва и за прехвърляне на данни от сензора към персонален компютър, където могат да се наблюдават графично в реално време. Всички данни от сензора се записват на флаш карта с памет Secure Digital (SD) и се систематизират във *.SAF файл. Създадените записи със този формат дават възможност на по късен етап те да бъдат анализирани от специализиран софтуер за спектрален анализ. В нашия случай използвания софтуер за анализ е JSESAME.

След представяне на хардуерната част на микропроцесорната система ANA, докторантът показва и разработването на корпуса на устройството, който е от голямо значение. За изработването на кутията е използван 3d принтер. Представен е общ три-измерен изглед на конструкцията на ANA, както и всички изработените отделни детайли, от които се състои. Изработен е действащ прототип на устройството, като за проверка на функционалността му резултатите от ANA са сравнени с тези от еталонна система за събиране на данни GBV-316. Стойностите за фундаменталните честоти, получени от записи с ANA и с GBV-316 са в границите на стандартното отклонение за стойността на фундаменталната честота, получено при многократно извършване на записи и анализ в продължение на 24 часа. Резултатите показват, че ANA може успешно да се използва за запис на случаен сеизмичен шум в определена точка и за последващо определяне на фундаменталната честота.

Експерименталната част представя изградената мрежа от точки, намираща се в западната част на гр. Пловдив, кв. „Христо Смирненски“. В нея са определени 85 места, в които са извършени 255 записи на микросеизмичен шум. Създадената мрежа от точки е оразмерена да обхване целия изследван квартал, като разстоянието между отделните точки е 150m и във всяка от тях са извършени три записа с продължителност 600s. Обоснован е изборът на апаратурата, с която са направени записите от мрежата, а имено трикомпонентна система за събиране на данни GBV-316. Този избор бе направен поради факта, че записите трябваше да започнат веднага, а разработката на ANA отне доста време. Извършените записи от района бяха анализирани със специализирания софтуер J-SESAME. Като резултат от анализа бяха определени фундаменталните честоти и усилването за всяка точка, като в ГИС среда бе картирано разпределението на тези параметри за изследвания район.

Бе демонстрирана добра корелация на получените фундаментални честоти с друга характеристика на плитката земна кора, а имено дълбочината до основната скала, която също има отношение при оценка на сеизмичната опасност.

Като обобщение, получените резултати от изследванията в дисертацията показват, че използваната HVSR методика е приложима и има големи предимства за оценка на локалните ефекти при наличие на сеизмично въздействие в района. Получените резултати могат да бъдат използвани от специалистите в строителството, които да се съобразят с разпределението на фундаменталните честоти, както и с разпределението на разстоянието до скалната подложка за изследвания район. Тези резултати не се изменят съществено с времето и от тази гледна точка са приложими както при по-дългосрочни планирания, свързани със строителството, така и при непосредствена първоначална оценка за района.

Приноси на дисертационния труд

1. Разработена е проект на безжична микропроцесорна система за цифров запис на микросеизмичен шум, Ambient Noise Accelerometer (ANA).

2. Конструирана е хардуерната част (електрониката) на устройството ANA и е изработен действащ прототип.

3. Във среда за програмиране Arduino е написан програмен код (source code), чрез който е програмиран микроконтролера, управляващ системата. ANA извършва записи на микросеизмичен шум във *.SAF формат, който по-късно се използва за спектрален анализ от софтуер JSESAME. Проектирана и изработена е корпусната конструкция (кутията) на устройството, чрез 3D технология.

4. Създадената микропроцесорна система е изпробвана в реални условия. За тестване на нейната функционалност бяха проведени сравнителни измервания с еталонна система GBV-316 и резултатите потвърдиха приложимостта на ANA.

5. За първи път е направено изследване на плитката земна кора в район от гр. Пловдив, който до момента не е изследван чрез HVSR метода. Той се намира в западната част от града (кв. „Христо Смирненски). В него е създадена мрежа от точки, в която са извършени над 300 записа.

6. Извършените записи от мрежата са анализирани със специализирания софтуер за спектрален анализ на микросеизмичен шум JSESAME. Чрез него са определени; фундаменталната честота f_0 на реагиране и усилването A_0. От получените резултатите е изчислена дълбочината до основната скална подложка.

7. Извършена беше проверка на един от критериите за надеждност на получените резултати чрез анализ от двадесет и четири часов запис в една точка.

8. На база получените резултати от записите от мрежата, е създадена карта, представяща разпределението на фундаменталната честота в изследвания кв. „Хр. Смирненски“ от гр. Пловдив и е предложена интерпретация на резултатите.

Ползвана литература

Aki, K. (1993), Local site effects on weak and strong ground motion, *Tectonophysics*, *218*, 93-111.

Asi, A. (2000), *GBV-116/316 (W) Operation Manual*, GeoSIG Ltd., Glattbrugg Atakan, K. (1995), A review of the type of data and the techniques used in empirical estimation of local site response, paper presented at Fifth International Conference on Seismic Zonation, Ouest Éditions, Presses Académiques, Nice, France.

Atakan, K., SESAME Working group, (2002), Final Report of the Instrument Workshop, 22-26 Oct.2001, University of Bergen, Norway, WP02 of the SESAME-Project "Controlled Instrumental Specifications", Deliverable D01.02., 45 pp, Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen.

Bard P-Y, The SESAME team (2004) Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on Ambien vibrations: measurements, processing and interpretation. Université Joseph Fourier. http:// sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Del-D23-HV_User_Guidelines.pdf

Bard, P.-Y. (1994), Effects of surface geology on ground motion: recent results and remaining issues paper presented at 10th European Conference on Earthquake Engineering, Austria, Vienna

Bard, P.-Y. (1999). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? In: Irikura, K., Kudo, K., Okada, H., and Sasatani, T. (Eds.) (1999). The effects of surface geology on seismic motion. Proc. 2nd International Symposium in Yokohama, Japan, 1-3 Dec. 1998, A. A. Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 030 2, 1251-1279.

Bonnefoy-Claudet, S., F. Cotton, and P.-Y. Bard (2006), The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review. Earth Science Review, volume 79, pages 205–227.

Borcherdt, R. D. (1970), Effects of local geology on ground motion near San Francisco bay, Bulletin of the Seismological Society of America, 60, 29-61.

Dimitrova, L., 2009. Analysis and automation of seismological observations in digital system of NOTSSI. PhD Thesis, (in Bulgarian), 200 pp., Geophysical Institute-BAS, Sofia, February 2009.

DIPOSE, Report of the Directorate of helping and restoration in seismic area on the activity between 25 April 1928 and 1 November 1931, 1931, Ministry of Inner Affairs and Social Health, Sofia, 421 pp. (in Bulgarian)

F. Ardhuin, E. Stutzmann, M. Schimmel, and A. Mangeney (2011), Ocean wave sources of seismic noise. Journal of Geophysics Research, volume 115.

Field, E., and K. H. Jacob (1995), A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are notreference site dependent, Bulletin of the Seismological Society of America, 85, 1127-1143.

Gospodinov, D., B. Ranguelov, V. Karakostas, E. Papadimitriou, A. Tanev and A. Kandilarov (2007), Preliminary results on the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations in the town of Yambol, Proceedings of the National Conference with international participation GEOSCIENCES 2007, 127-128

Gospodinov, D., Zlatanski, D., Ranguelov, B., Kandilarov, A. (20018), ON THE POSSIBILITY TO ANALYZE AMBIENT NOISE RECORDED BY A MOBILE DEVICE THROUGH THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE. Chemistry: Bulgarian Journal of Science Education. Volume 27 Number 5, (pp. 666 - 674), 2018

Gospodinov, D., Zlatanski, D. (2018), Comparison of Geopsy and J-Sesame software results from the ambient noise analysis at some new sites in Plovdiv, Bulgaria. BULGARIAN GEOPHYSICAL SOCIETY Volume 9 (pp 51 – 56), 2018 http://www.bggs.eu/Conferencia_2018/Reports/N9.pdf.

Zlatanski, D., Gospodinov, D. Wireless mobile digital device for ambient noise recording, Conference Paper, EAGE Publishing BV, BGS 20192019 10th Congress of Balkan Geophysical Society, BGS 2019; Albena; Bulgaria; 18 September 2019, ISBN: 978-946282303-7

Havskov, J., and G. Alguacil (2004), Instrumentation in earthquake seismology, 1st ed., 358 pp., Springer.

Kandilarov, A., (2005), Site effects assessment using H/V spectral ratios in Bergen, Norway and Plovdiv, Bulgaria, MSc thesis, Hovedoppgave i geovitenskap - Universitetet i Bergen, 2005 II, Object ID71503616020002201

Kandilarov, A., Atakan, K., Havskov, J., Gospodinov, D. (2009), An investigation of the significance of local site effects in Plovdiv, Bulgaria. Bull Earthquake Eng 7, 181–198 (2009). https://doi.org/10.1007/s10518-008-9091-4

Kedar, S., M. Longuet-Higgins, F. W. N. Graham, R. Clayton, and C. Jones (2008). The origin of deep ocean microseisms in the north Atlantic ocean. Proceedings of the Royal Society of London, series A, pages 1–35.

Konno, K. and T. Ohmachi, (1998), Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 88, No. 1, pp. 228-241

Lacave C, Bard P-Y, Koller M G (1999) Microzonation: techniques and examples In: Block 15: Naturgefahren-Erdbebenrisiko. http://www.ndk.ethz.ch/pages/publ/Koller.pdf, pp23

Lachet, C. and P.Y. Bard (1994), Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of the "Nakamura's" technique. Submitted to Journal of Physics of the Earth

Langston, C. A. (1979). Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves, J. Geophys. Res. 84, 4749–4762.

Lermo, J., and F. J. Chavez-Garcia (1993), Site effects evaluation using spectral ratios with only one station, Bulletin of the Seismological Society of America, 83, 1574-1594.

Liu, H. P., Warrick, R.E., Westerlund, R.E., Sembera, E.D., Wennerberg, L. (1992), Observation of local site effects at a downhole-and-surface station in the Marina District of San Francisco, Bulletin of the Seismological Society of America, 82, 1563-1594.

Naderyan V, Hickey C, Raspet R. Wind-Induced Ground Motion. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 121.2 (2016): 917-930.

Nakamura Y (2008) On the H/V spectrum. In: Proceedings of the 14th world conference on earthquake engineering (WCEE), Beijing. http://www.nicee.org/wcee/

Nakamura, Y. (1989), A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quarterly Report of RTRI, 30, 25-33.

Nakamura, Y. (1997). Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures using Microtremor, World Congress on Railway Research in Florence, Italy.

Nakamura, Y. (2000), Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications, paper presented at 12th World Conference on Earthquake Engineering, Aukland, New Zealand.

Nogoshi, M., and Igarashi, T. (1970). On the propagation characteristics of microtremors, J. Seism. Soc. Japan, 23, 264–280.

Nogoshi, M., and Igarashi, T. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor (part 2). J. Seism. Soc. Japan, 24, 26-40.

Oynakov, E., 2017. Microseismic noise, practical applications, PhD Thesis, (in Bulgarian), 209 pp., University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 2017

Ozel, O., Cranswick, E., Meremonte, M., Erdik, M., Safak, E. (2002), Site effects in Avcilar, west of Istanbul, Turkey, from strong- and weak-ground motion data, Bulletin of the Seismological Society of America, 92, 499-508.

Parolai S., Bindi, D., Ansal, A., Kurtulus, A., Strollo, A. and Zschau, J. (2010a). Determination of shallow S-wave attenuation by down-hole waveform deconvolution: a case study in Istanbul (Turkey). Geophys. J. Int., doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04567.x

Parolai, S., and Richwalski, S. M. (2004). The importance of converted waves in comparing H/V and RSM site responses. Bull. Seism. Soc. Am., 94, 304–313.

Rogers, A. M., Borcherdt, R.D., Covington, P.A., Perkins, D.M. (1984), A comparative ground response study near Los Angeles using recordings of Nevada nuclear tests and the 1971 san Fernando earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, 74, 1925-1949.

Sato, T., Saita, J., Nakamura, Y. (2004): Evaluation of the Amplification Characteristics of Subsurface using Microtremor and Strong Motion – the Studies at Mexico City, 13th WCEE.

Schmandt, B., R. Aster, D. Scherler, V. C. Tsai, and K. Karlstrom (2013), Multiple fluvial processes detected by riverside seismic and infrasound monitoring of a controlled flood in the Grand Canyon, Geop. Res. Lett., 40, doi:10.1002/grl.5095

Singh, S. K., Lermo, J., Dominguez, T., Ordaz, M., Espinosa, J.M., Quaas, R. (1988), The Mexico earthquake of September 19, 1985 – A study of amplification of seismic waves in the valley of Mexico with respect to a hill zone site, Earthquake spectra, 1, 653-673.

Wald, L. A., and J. Mori (2000), Evaluation methods for estimating linear site response amplifications in the Los Angeles region, Bulletin of the Seismological Society of America, 90, S32-S42.

Withers, M. M., R. C. Aster, C. J. Young, and E. P. Chael (1996), High-frequency analysis of seismic background noise as a function of wind speed and shallow depth, Bulletin of the Seismological Society of America, 86(5), 1507-1515.

S. Bonnefoy-Claudet, F. Cotton, and P.-Y. Bard (2006), The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review. Earth Science Review, volume 79, pages 205–227.

F. Ardhuin, E. Stutzmann, M. Schimmel, and A. Mangeney (2011), Ocean wave sources of seismic noise. Journal of Geophysics Research, volume 115.

Dikmen, U., Mirzaoglu, M. (2005), The seismic microzonation map of Yenisehir–Bursa, NW of Turkey by means of ambient noise measurements, Journal of Balkan Geophysical Society, 8 (2) (2005), pp. 53-62

Zlatanski, D., Gospodinov, D. Wireless mobile digital device for ambient noise recording, Conference Paper, EAGE Publishing BV, BGS 20192019 10th Congress of Balkan Geophysical Society, BGS 2019; Albena; Bulgaria; 18 September 2019, ISBN: 978-946282303-7

Интернет източници

1. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl354_355.pdf
2. https://www.analog.com/en/products/ADXL355.html#product-overview
3. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/EVAL-ADXL354-355-UG-1030.pdf
4. https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf
5. Ceresana. "Bioplastics - Study: Market, Analysis, Trends - Ceresana". www.ceresana.com. Archived from the original on 4 November 2017. Retrieved 9 May2018.
6. https://amslaurea.unibo.it/17536/1/Kia.AghayeGhazvini-Thesis.pdf
7. https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
8. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_2270.pdf
9. ftp://ftp.geo.uib.no/pub/sesame/JSESAME/SESAME-WP03-Deliverable.doc
10. ftp://ftp.geo.uib.no/pub/seismo/SOFTWARE/SESAME/USER-GUIDELINES/SESAME-HV-User-Guidelines.pdf

Авторски публикации

1. Gospodinov, D., Zlatanski, D., Ranguelov, B., Kandilarov, A. ON THE POSSIBILITY TO ANALYZE AMBIENT NOISE RECORDED BY A MOBILE DEVICE THROUGH THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE. Chemistry: Bulgarian Journal of Science Education. Volume 27 Number 5, (pp. 666 - 674), 2018. SJR-0.19 http://khimiya.org/show_issue.php?y=2018&vol=27&issue=5&i_id=75
2. Gospodinov, D., Zlatanski, D. Comparison of Geopsy and J-Sesame software results from the ambient noise analysis at some new sites in Plovdiv, Bulgaria. BULGARIAN GEOPHYSICAL SOCIETY Volume 9 (pp 51 – 56), 2018 http://www.bggs.eu/Conferencia_2018/Reports/N9.pdf.
3. Zlatanski, D., Gospodinov, D. Wireless mobile digital device for ambient noise recording, Conference Paper, EAGE Publishing BV, BGS 2019. 10th Congress of Balkan Geophysical Society, BGS 2019; Albena; Bulgaria; 18 September 2019, ISBN: 978-946282303-7 https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-5086057295&origin=AuthorNamesList&txGid=1a5c5a4e44db910b315894144dfc6fd1 (indexed Scopus)
4. Златански, Д., Господинов, Д., (2021). Запис и Анализ на микросеизмичен шум. Пловдивско университетско издателство ”Паисий Хилендарски”. (приета за печат)
5. Sotirov, S. I., Gospodinov, D. K., Zlatanski, D. A. (2016a). A device for the analysis of photovoltaic panels. Bulgarian Chemical Communications, Volume 48, Special Issue E (pp. 147 - 151) IF-0.349 http://www.bcc.bas.bg/bcc_volumes/Volume_48_Special_E_2016/Special%20Issue%20E/Statii/Pages147-151.pdf
6. Sotirov, S. I., Gospodinov, D. K., Stoyanova-Petrova, S. V., Zlatanski, D. A. (2016b). Software for measuring the characteristics of photovoltaic panels. Bulgarian Chemical Communications,Volume 48, Special Issue E (pp. 152 - 157) IF-0.349 http://www.bcc.bas.bg/bcc_volumes/Volume_48_Special_E_2016/Special%20Issue%20E/Statii/Pages152-157.pdf

Доклади от научни форуми

Gospodinov, D., Zlatanski, D., Ranguelov, B., Kandilarov, A. ON THE POSSIBILITY TO ANALYZE AMBIENT NOISE RECORDED BY A MOBILE DEVICE THROUGH THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE. National Forum of Physics "PHYSICS - FOREVER YOUNG SCIENCE". From 27 to 29 October 2017 in Varna (SOC Kamchia - hotel complex "Longoz")

Gospodinov, D., Zlatanski, D., Sotirov, S. Elaboration of a Lab Exercise to Analyze the Characteristics of Photovoltaic Panels Through A V-I Electronic Unit. National Forum of Physics "PHYSICS - FOREVER YOUNG SCIENCE". From 27 to 29 October 2017 in Varna (SOC Kamchia - hotel complex "Longoz")

Gospodinov, D., Zlatanski, D. Comparison of Geopsy and J-Sesame software results from the ambient noise analysis at some new sites in Plovdiv, Bulgaria. IX National Geophysical Conference, 30th November 2018 Sofia, Sofia University "St. Kliment Ohridski”

Zlatanski, D., Gospodinov, D. Wireless mobile digital device for ambient noise recording. 10th Congress of Balkan Geophysical Society, BGS 2019; Albena Resort, Albena; Bulgaria; 18 September 2019 through - 22 September 2019

Sotirov, S. I., Gospodinov, D. K., Zlatanski, D. A. (2016a). A device for the analysis of photovoltaic panels. XV International Scientific Conference "RE & IT - 2016" RENEWABLE ENERGY & INNOVATIVE TECHNOLOGIES, 10-11 June, 2016, Smolyan, Bulgaria http://www.tk-smolian.eu/uploads/media/Programme.pdf

Sotirov, S. I., Gospodinov, D. K., Stoyanova-Petrova, S. V., Zlatanski, D. A. (2016b). Software for measuring the characteristics of photovoltaic panels. XV International Scientific Conference "RE & IT - 2016" RENEWABLE ENERGY & INNOVATIVE TECHNOLOGIES, 10-11 June, 2016, Smolyan, Bulgaria http://www.tk-smolian.eu/uploads/media/Programme.pdf