

Софийски университет „Св. Климент Охридски“

Физически факултет

Катедра „Метеорология и геофизика“



АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация в изпълнение на изискванията за придобиване на
образователна и научна степен „ДОКТОР“

на Люба Димова Димова

професионално направление 4.1. Физически науки

научна специалност: „Физика на океана, атмосферата и околоземното
пространство“

на тема:

Изследване на цунамигенни зони в Източното Средиземноморие

Научен ръководител: доц. д-р Ренета Райкова

София, 2018 г.

Люба Димова е редовен докторант към катедра „Метеорология и геофизика“, Физически факултет, Софийски университет „Св. Климент Охридски“ в периода 2015-2018 г.

Данни за дисертационния труд:

Брой страници в дисертацията: 147

Брой фигури: 93

Брой таблици: 13

Брой приложения: 4

Брой фигури в приложения: 11

Брой на цитирани литературни източници: 137

Брой публикации на автора по темата на дисертацията: 8

Брой доклади на международни и национални конференции: 8

Общ брой страници: 167

БЛАГОДАРНОСТИ

Бих искала да изразя своята огромна благодарност на моя научен ръководител доц. д-р Ренета Райкова, за нейните напътствия и подкрепата ѝ в това изследване, през целия период на моята докторантура. От съществено значение е да се посочи, че без нейния надзор, тази работа не би могла да бъде завършена.

Също така бих искала да благодаря на проф. Стефано Тинти, д-р Алберто Армилято, д-р Джанлука Паньони и д-р Филипо Занибони, за тяхното ръководство през периода ми на обучение в Университета в Болоня, Италия. Изказвам своята благодарност за предоставената възможност да работя с числения модел UBO-TSUFDF, за симулации на вълни цунами.

Не на последно място, искам да изразя благодарности към всички колеги от катедра „Метеорология и геофизика“ към Физически факултет, за тяхната безусловна помощ в различни аспекти по време на целия изследователски период.

Материалите по защитата са на разположение на интересувашите се в канцеларията на СУ „Св. Климент Охридски“, Физически факултет, София 1164, бул. „Джеймс Баучер“ 5.

Съдържание

I.	Обща характеристика на дисертационния труд.....	4
1.	Актуалност на темата.....	4
2.	Цел и задачи на дисертационния труд.....	4
3.	Научна новост и принос на автора.....	5
4.	Обем и структура на дисертацията.....	5
II.	Кратко изложение на дисертационния труд.....	6
1.	Цунами - характеристики и изследвания.....	6
1.1.	Исторически събития.....	6
1.2.	Тектоника и сеизмичност.....	7
1.3.	Характеристики на вълните цунами.....	7
2.	Моделиране на вълни цунами.....	8
2.1.	Генериране на цунами. Метод на Окада.....	8
2.2.	Разпространение на цунами. Модел UBO-TSUFД.....	9
3.	Резултати от численото моделиране в Източното Средиземноморие.....	11
3.1.	Въведение.....	11
3.2.	Сценарии в Черно море.....	14
3.3.	Сценарии в Егейско море.....	19
3.3.1.	Числено моделиране на вълните цунами от земетресението на 20 юли 2017 г. (M _w =6,6) в Бодрум-Кос, Егейско море.....	24
3.3.2.	Влияние на вълните цунами върху о. Карпатос, генерирани от земетресението през 1303 г.....	26
3.4.	Сценарии в Източното Средиземноморие.....	28
4.	Карти на опасността от цунами. Анализ на резултатите.....	31
4.1.	Черно море.....	31
4.2.	Егейско море.....	35
4.3.	Източно Средиземноморие.....	37
III.	Научна дейност на докторанта.....	39
IV.	Литература.....	42

I. Обща характеристика на дисертационния труд

1. Актуалност на темата

Потребността от периодично осъвременяване на оценката на природните разрушителни процеси в области, податливи на такива явления, се мотивира от тяхната висока активност през последните години. Вълните цунами се наблюдават както в потенциално познати зони, така и в не толкова добре изучени райони, което довежда до необходимостта от изучаване на този феномен. Въпреки, че потенциалната опасност от цунами в Средиземно море не е толкова висока, колкото в Тихия Океан, височините на наблюдаваните вълни в някои зони достигат 30 m. Към 2018 г. в района на Източното Средиземноморие, включително Черно море има около 150 регистрирани или наблюдавани вълни цунами. Феноменът цунами е нелинеен процес и строго зависи от източника на генериране и от релефа на бреговите райони.

Работата се мотивира от необходимостта да бъдат предприети мерки и действия, насочени към:

- предотвратяване и намаляване на степента на опасност от цунами;
- ограничаване на последствията от цунами;
- защита и опазване на населението, материалните фондове и околната среда от въздействията на вълните цунами.

Една от важните стъпки за разбиране на феномена, както и превенция на ефектите от цунами са числените модели, които спомагат реконструирането на исторически или съвременни събития, участват в изготвянето на системите за ранно предупреждение.

2. Цел и задачи на дисертационния труд

Основна цел на проведеното изследване е да се **оцени цунамигенният потенциал на сеизмични източници в района на Източното Средиземноморие.**

За постигане на основната цел са формулирани **следните задачи:**

- ❖ Събиране на данни за топография и батиметрия в изследвания район, с детайлна разделителна способност;
- ❖ Проучване на сеизмични източници и възможни цунамигенни зони, както и определяне на техните характеристики: фокален механизъм, дълбочина, максимален магнитуд в исторически план, геометрия (дължина, ширина и отместване по разломяването);
- ❖ Оценка на първоначалните премествания на водната повърхност, предизвикани от съответното разломяване;
- ❖ Оценка на полето на разпространение на възникналите вълни цунами, вследствие на земетресение;
- ❖ Анализ на максималните и минималните височини на разпространяващите се вълни цунами;
- ❖ Получаване на времената на пристигане на вълните цунами до различни точки от бреговата линия;
- ❖ Изчисляване на синтетични мареограми в определени точки в близост до населени места, за да се оцени амплитудата на вълните цунами за определен период от време;
- ❖ Оценка на вертикалния воден стълб на сушата.

3. Научна новост и принос на автора

При разработването на настоящия дисертационен труд, е използван числен модел за симулиране на генерирането, разпространението и въздействието върху бреговите райони на вълни цунами. Кодът UBO-TSUFD е разработен от изследователски екип от Университета в Болоня (Италия) и е предоставен за ползване, за целите на дисертацията.

Основен принос на дисертационния труд е направената оценка за цунамигенният потенциал на 13 сеизмични зони, в които са изследвани 24 сеизмични източника, в района на Източното Средиземноморие, използвайки единна методология, включваща задълбочен анализ на сеизмичните източници и техните параметри, числено моделиране на процеса на генерация, разпространение и въздействие на брега на вълните цунами, оценка на резултатите и сравнение с налични реални данни. Направена е оценка на потенциално застрашените области от сушата с воден стълб над 0.5 m за Черно море, южната част на Егейско море и за Източно Средиземноморие.

Детайлно е изследвано въздействието на вълни цунами върху североизточното крайбрежие на България, като са моделирани три възможни разломни конфигурации, всяка от които с магнитуди 7.0, 7.5 и 8.0 (общо 9 сценария). Оценени са потенциално застрашените зони.

Моделирани са вълни цунами от земетресението в района на Бодрум-Кос през 2017 г., постигайки много добри съвпадения с наблюденията, изследвайки няколко конфигурации на сеизмичния източник.

Моделирани са вълните цунами от земетресението през 1303 г. в района на Източната Елинска Дъга, със специално внимание на ефектите върху о. Карпатос, което не е правено досега.

4. Обем и структура на дисертацията

Дисертационният труд е представен на 147 страници, с изчерпателно описание на свършената работа и получените резултати. Работата се състои от увод, 4 глави и заключение. Формулирани са основните приноси на дисертационния труд, представени са списък на публикациите и участие в конференции; цитирана литература; 4 приложения (20 страници, 11 фигури, примерни входни файлове на модела).

В **ГЛАВА 1.** са представени исторически данни за вълни цунами в изследвания район. Разгледана е тектониката и сеизмичността в Черно море, Егейско море и Източното Средиземноморие. Направен е кратък обзор на основните характеристики на вълните цунами, тяхното образуване, физичните им параметри и методите за моделиране на цунами.

В **ГЛАВА 2.** се представени физико-математични основи на използвания метод за моделиране на цунами. Разгледани са етапите във формирането на феномена цунами: възникване, разпространение, взаимодействие с брега. Представена е параметризацията на модела.

В **ГЛАВА 3.** са описани резултатите от числените симулации, получени по време на дисертационното изследване. Резултатите са разделени по зони, спрямо географското си положение: Черно море, Егейско море и Източно Средиземноморие.

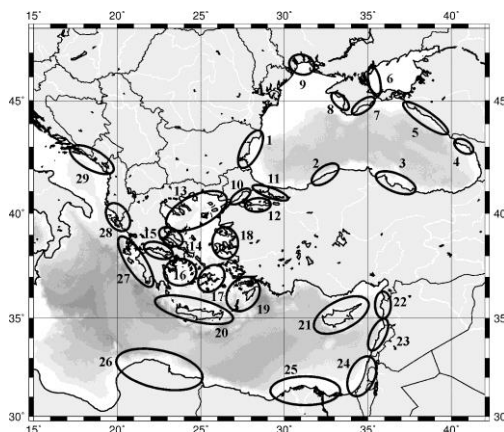
В **ГЛАВА 4.** е направена оценка на цунамигенния потенциал на различните зони. Построени са карти на евентуалната опасност от цунами за всички райони. Оценено е влиянието на магнитуда върху растежа на височините на вълните цунами.

II. Кратко изложение на дисертационния труд

1. Цунами - характеристики и изследвания

1.1. Исторически събития

Разгледаните исторически данни за вълни цунами са разделени по зони (Фиг. 1.1.), в зависимост от географското разположение, както и в съответствие с представените в [1] литературни извадки.



Фиг. 1.1. Зони в Източно Средиземноморие и Черно море с наблюдавани вълни цунами (по исторически документи или измервания, обобщени в [1]).

В редица статии се споменават пет събития на вълни цунами в сеизмична зона Шабла-Калиакра (*Зона 1*). Едно от добре документирани, ключови за региона, историческо земетресение и цунами, е през 544-545 г. в Одесос (днешна Варна) и Дионисополис (днешен Балчик). Полеви изследвания, а именно слой отложен пясък, доказват съществуването на локално цунами, свързано със земетресение с $M > 7,6$ през 543 г., причинило наводнение в древния археологически храм Кибела в Балчик [2,3]. Най-силното земетресение ($M=7,2$) в района Шабла - Калиакра за миналия век е станало на 31 март 1901 г. По разкази на очевидци, височината на образувалата се вълна варира в интервала 2,5-3,0 m, а пристанището на Балчик бива наводнено [4]. В *Зона 2* земетресението от 3.09.1968 г. в Бартин (Северна Турция), с магнитуд $M=6,6$, причинява сериозни щети, генерирайки вълни цунами в Амасра [3,5,6], а вертикалното отместване на бреговата ивица в Амасра е 35-40 cm [3]. Друго земетресение, предизвикало цунами е през 1939 г. в *Зона 3* с магнитуд по повърхностни вълни $M=8,0$. Епицентърът на земетресението е на 60 km навътре в сушата, като това е един от потвърдените случаи на вълни цунами с източник – земетресение на сушата [5]. *Зони 4* и *5* се намират в Източно Черно море, на границата с Русия и Грузия. Катастрофално земетресение ($M > 6,5$) в района на залива Сухуми в Западна Грузия е причина за вълни цунами през първата част на I в. сл. Хр (височина на вълните на сушата 2,5 m [3,6]). По Руското крайбрежие на Черно море са наблюдавани няколко събития на вълни цунами, като едно от тях е през 1966 г. с магнитуд $M=5,8$ и за него *Рангелов и др. (1987)*, прилагат спектрален анализ на мареограмите [8]. В исторически план в района на Кримски полуостров (*Зони 7 и 8*) са наблюдавани редица събития на вълни цунами. Земетресението от 1927 г. е било с магнитуд $M_s=6,0$, а епицентърът се намира на континенталния склон южно от Ялта, като причинява вълни цунами по южното крайбрежие на Крим [3,6]. Тези вълни цунами са регистрирани от мареографската мрежа, като максималните височини на вълните са 24 cm в Ялта [9].

По своето географско положение, Егейско море се простира на границата на тектонски плочи, включва вулканични арки, както и редица островни групи. Това води до разнообразието при механизмите на образуването на вълни цунами: земетресения, свлачища и вулканични изригвания. Минойското изригване на Тира (Санторини) през 1613 ± 13 г. пр. Хр., образува вълни цунами с амплитуда надвишаваща 20 m [10]. Покоротно силно земетресение от 9.07.1956 г. с магнитуд $M=7,5$ в района на Цикладите, предизвиква цунами с височини на вълните вариращи от 15 до 30 m [11]. Едно от ключовите събития в Източното Средиземноморие, спомагащи за разбирането на феномена цунами, както и исторически потвърдено, е през 365 г. западно от Крит. Смята се, че земетресението е с магнитуд $M=8,3$ като предизвиква разкъсване по западния сегмент на Елинската дъга и по този начин генерира цунами, което се разпространява в цялото Средиземноморие [11]. Според много автори цитирани в [12], силно земетресение през 1303 г. с магнитуд около $M=8,0$ разкъсва източния сегмент от Елинската дъга, намиращ се между островите Родос и Крит. Наблюдават се наводнения по бреговете на Крит, Даламан (Турция), Израел, Палестина, Египет [10].

Сеизмичността в най-източната част на Средиземно море е съсредоточена по Кипърската дъга и Ливанския рифт. Остров Кипър неведнъж е бил опустошаван и наводняван от цунами, като това през май 1202 ± 1 г. с интензивност VII степен [13]. По данни от каталози [13], цунами преминава през Ливанския бряг, като първо морето се отдръпва на около 1,6 km навътре, градове като Бейрут, Сур, Сидон, Триполи (Ливан) са частично разрушени от земетресението и последвалото цунами [14].

1.2. Тектоника и сеизмичност

Черно море се разполага в рамките на Анадолския сектор от Алпийско-Хималайската орогенна система. В този регион движещите се на север Африканска и Арабска плочи се сблъскват със Евразийската тектонска плоча. При тази колизия, Анадолският блок се придвижва на запад с ротационно движение, фокусирано на север от полуостров Синай [15]. Основно проявата на сеизмичност може да бъде разделена на райони, както следва: Кримски полуостров, Западната част на Кавказкия регион, Северо-Анадолския разлом – Понтийски планини, сеизмична зона Шабла-Калиакра и Вранчанска сеизмична област.

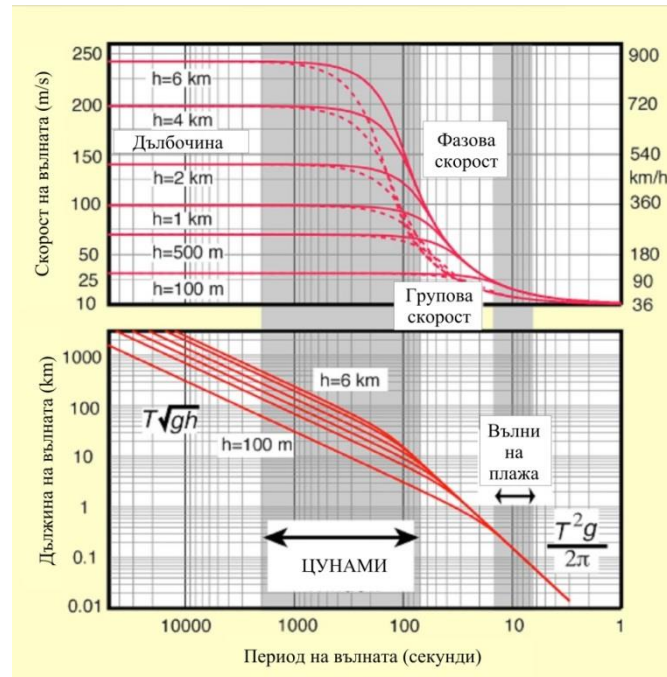
Анадолският и Егейският регион включват голяма част от Гърция и Турция. Районът се откроява с висока сеизмична дейност. Зоната, в която преобладава субдукцията е т.нар. Елинска дъга, където става подпъхване на Африканската плоча под Егейско море с приблизително 10 mm/у.

В най-източната част на Средиземно море се простират Африканската и Арабската плочи, които се сблъскват с Анадолската микроплоча, където се простира и т.н. Кипърска дъга. Сеизмичността се изразява предимно по южното крайбрежие на Кипър (Кипърската дъга), по протежението на Ливанския рифт и южното крайбрежие на Турция, където се забелязват и по-дълбоки земетресения. Режимът на деформациите на земетресенията по продължението на източната Кипърска дъга е лявоотседен. Въпреки това, субдукцията в тази област доминира и е потвърдена от батиметрични и гравиметрични данни [16].

1.3. Характеристики на вълните цунами

В буквален превод от японски език, терминът цунами означава „пристанищна вълна“ – “tsu” – пристанище, “nami” – вълна. Този феномен се характеризира със серия от вълни, които се разпространяват с изключително голяма дължина и период на вълната, като най-често се генерират от внезапни деформации на океанското дъно,

вследствие от подводни земетресения. Вулканични изригвания, свлачища, атмосферни смущения, също могат да бъдат причина за пораждаване на цунами. По своя характер те се класифицират като гравитационни вълни с период на вълните между 10 и 60 минути. Скоростта на вълните цунами зависи от дълбочината на басейна (Фиг. 1.2.). В дълбоки води дължината на вълната достига стотици километри и пътува със скорост от 600 до 900 km/h. При приближаване към брега, вълната се свива (дължината на вълната намалява до 20 km) и скоростта спада значително до 80 km/h, докато амплитудата изразително нараства.



Фиг. 1.2. Горен панел: Фазова и групова скорост на вълни цунами, разпространяващи се в плосък океан с дълбочина от 100 m до 6 km. Долен панел: Зависимост между дължината на вълната и периодът на вълната [17].

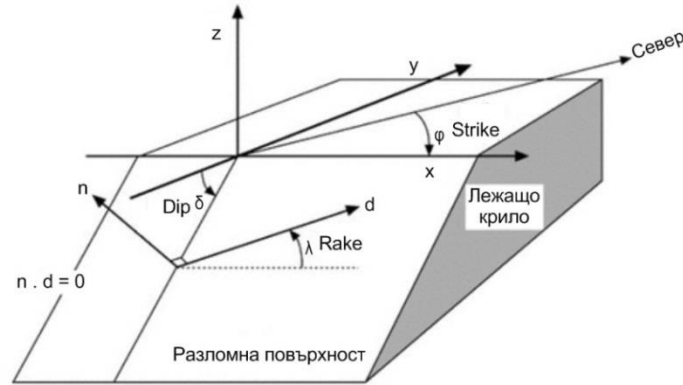
2. Моделиране на вълни цунами

Мощен инструмент за изследване на вълните цунами е численото им моделиране. При него е възможно построяването на различни по сложност и пълнота математични модели, чиито решения се намират числено. Численото моделиране на вълните цунами позволява детайлно изследване на процесите на генериране, разпространение, разрушаване на вълните цунами, а също така и на въздействието им върху крайбрежните райони. Числените модели могат да бъдат използвани и за реконструиране на съвременни или минали събития. Моделираните сценарии спомагат за изготвяне на прогнози за влиянието и наводненията от цунами, както и при системите за ранно оповестяване.

2.1. Генериране на цунами. Метод на Окада

За да се моделира цунами, генерирано от земетресение, е необходимо отместването по разломната равнина да бъде преобразувано в деформация на морското дъно. Това често се прави, като се използва методът предложен от Окада [18,19]. Окада представя пълен набор решения за всеки точков източник, както и за всеки краен правоъгълен елемент за произволна дълбочина и ъгъл на затъване (dip). Уравненията се състоят от осем компонента: дължина, ширина, ъгъл на затъване (dip), дълбочина на разместената равнина, трите компоненти на вектора на отместване и коефициент на

Поасон. Всеки разгледан правоъгълен елемент има множество параметри, определящи относителното отместване на разломните равнини, една спрямо друга. Фокалният механизъм е най-важният параметър, чрез който се определя геометрията на разломите и чрез който можем да направим изводи за режима на напрежение в даден регион (Фиг. 2.1.).



Фиг. 2.1. Схематично представяне на трите ъгъла, определящи механизма на дадено земетресение [20].

2.2. Разпространение на цунами. Модел UBO-TSUFД

Вълните цунами се разпространяват във всички посоки от източника на генериране, като основната енергия на полето на разпространение е съсредоточена перпендикулярно на посоката на разкъсване по разлома. В открития океан, вълните цунами имат характер на дълги вълни, но с малки амплитуди, което ги отнася към теорията за плитка вода, т.е. дълбочината на океана е малка, отнесена към дължината на вълната.

Численият код UBO-TSUFД (*University of Bologna – TSUnami Finite Difference*) е използван за моделирането на разпространението на цунами и взаимодействието на вълните с бреговете. Моделът е разработен в Университета в Болоня (Италия), от работната група на проф. Стефано Тинти [21]. Теорията за разпространение на вълни цунами се базира на две уравнения: уравнение за непрекъснатост (закон за съхранение на масата) и уравнение за съхранение на момента, както и подходящи гранични условия. Кодът UBO-TSUFД решава уравненията на Навие-Стокс в приближение на плитка вода по метода на крайните разлики, чрез явни числени схеми. Дискретизацията по пространството е в декартова координатна система (Фиг. 2.2.). Триенето на дъното е взето предвид, а нелинейните уравнения за плитка вода имат вида:

$$u_t + uu_x + vu_y + g\eta_x + f_x = 0 \quad (1)$$

$$v_t + uv_x + vv_y + g\eta_y + f_y = 0 \quad (2)$$

$$\eta_t + (u(h+\eta))_x + (v(h+\eta))_y = 0 \quad (3)$$

където u и v са компоненти на скоростта, осреднени по дълбочина, съответно за хоризонталните координати x и y , g е земното ускорение, η е нивото на водния стълб над равновесната морска повърхност, h е дълбочина на водния стълб до равновесната повърхност, f_x и f_y са компоненти на триенето съответно за x и y . Интегралните потоци M и N по цялата дебелина на водния стълб [22] са свързани със скоростите u и v чрез формулите:

$$M = u(h + \eta) = uD \quad (4)$$

$$N = v(h + \eta) = vD \quad (5)$$

където $D = h + \eta$ е общият воден стълб. Уравнения (1)-(3) са преобразувани във вида:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + f_x = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + f_y = 0 \quad (7)$$

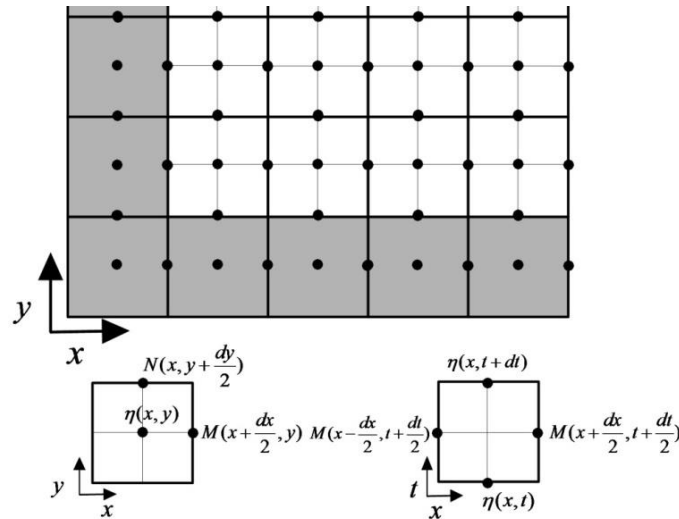
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

Обикновено коефициентите на триене f_x и f_y , се представят чрез потоците M , N и коефициентът на Manning за грапавост n :

$$f_x = \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{(M^2 + N^2)} \quad (9)$$

$$f_y = \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{(M^2 + N^2)} \quad (10)$$

Коефициентът на Manning варира между $0,01 - 0,06 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Нивото η се пресмята в центъра на всяка клетка от мрежата, докато потоците M и N са отместени с половин пространствена стъпка в съответните посоки.

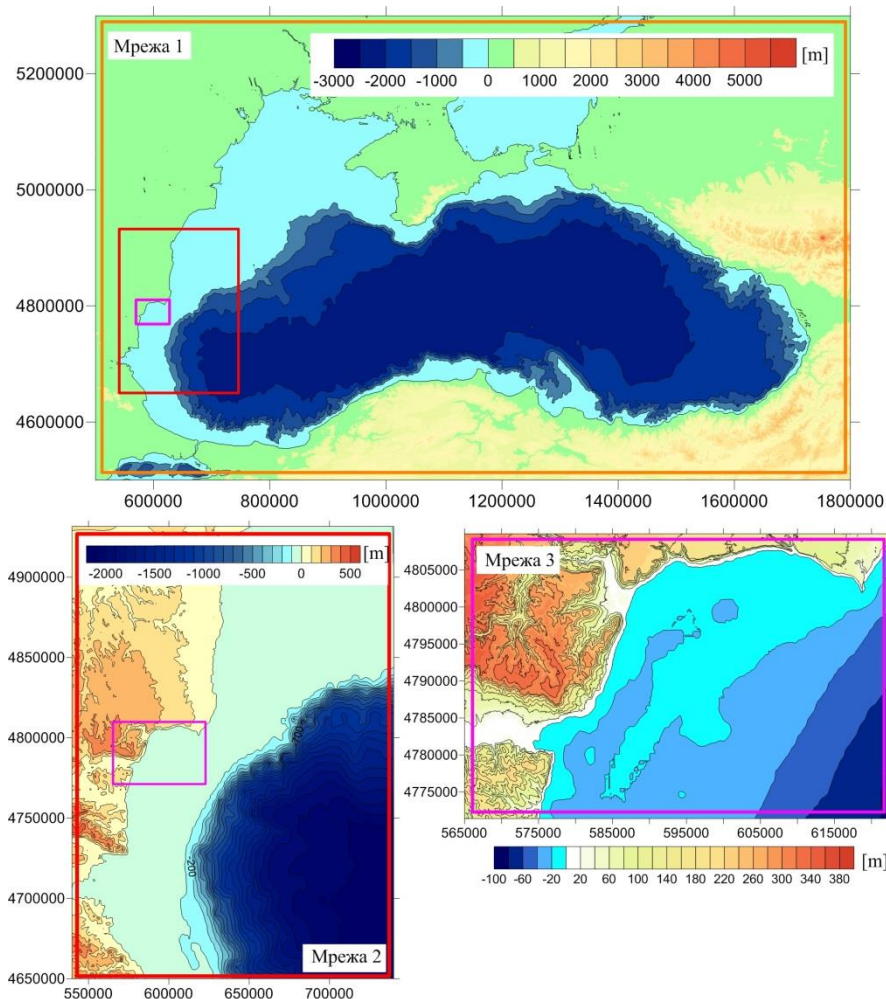


Фиг. 2.2. Моделна мрежа. Горен панел: пример за пространствена мрежа. Долен панел: (ляво) определение за дискретизирани променливи по пространство и (дясно) по време [21].

3. Резултати от численото моделиране в Източното Средиземноморие

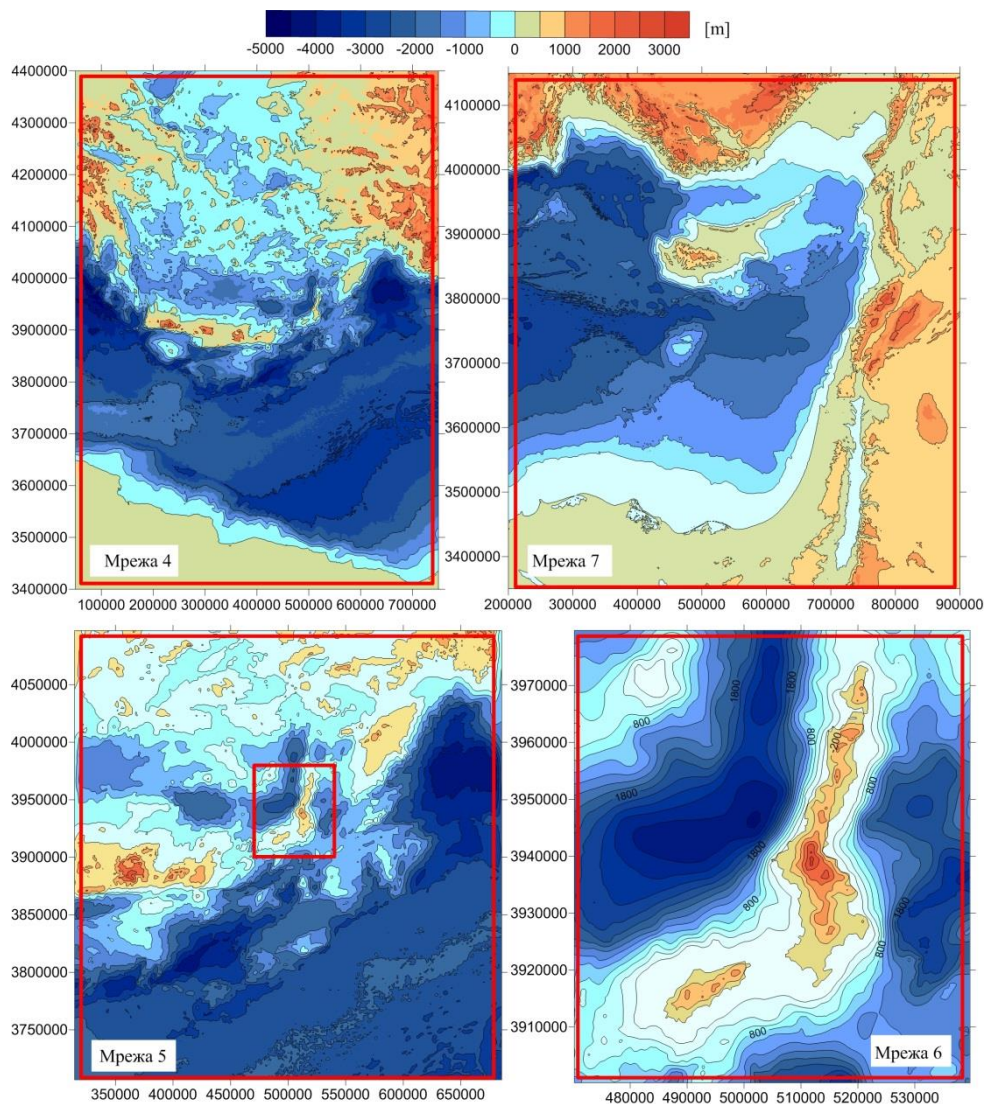
3.1. Въведение

Получените резултати от моделирането на цунами са разделени по региони спрямо географското им местоположение: Черно море, Егейско море и Източно Средиземноморие. За всяка област са построени мрежи на топографията и батиметрията. Събраните данни са от различни източници със свободен достъп: *GEBCO*, *SRTM*, *EMODNET*. Използваните мрежи в изследвания район са представени на Фиг. 3.1. и Фиг. 3.2., а техните характеристики са разгледани подробно в дисертацията.



Фиг. 3.1. Топография и батиметрия на използваните мрежи в Черно море.

В подготовката на входните файлове, необходими за моделиране на вълните цунами, се дефинира магнитудът за всеки избран сеизмичен източник. Магнитудът се използва и в равенствата за изчисляване на геометрията на разлома, която от своя страна е пресметната чрез статистически регресии, които дават връзката между дължината, ширината и отместването по разломната повърхност и моментният магнитуд или сеизмичният момент. В симулациите представени в настоящата дисертация са използвани предложените от [23,24] равенства.



Фиг.3.2. Топография и батиметрия на мрежите в Егейско море и Източното Средиземноморие.

Избраните магнитуди, представени в Таблица 3.1., са в съответствие с исторически събития. Зоните са номерирани според обозначенията използвани в [1]. За района на Черно море, имената на източниците съответстват на географското им положение. Сеизмичните източници в Егейско море и в Източното Средиземноморие са именувани по данни от Европейската база данни за сеизмогенни разломи (*SHARE*, *GreDaSS*) [25,26].

Фокалните механизми (представени в Таблица 3.2.) на моделираните събития са в съответствие с исторически или скорошни земетресения [27]. Схематичното представяне на механизмите е визуализирано чрез GMT [28]. Визуализацията на изходните данни от моделирането е направена чрез софтуерните пакети GMT 5, Surfer 11 и Grapher 9.

За всеки от избраните сеизмични източници (хипотетични или реални) са построени: началните условия за генериране на вълни цунами; полето на разпространение на вълните; полето на максималните амплитуди на вълните; направена е оценка на влиянието на вълните цунами по крайбрежните зони чрез синтетични мареограми; направена е оценка на опасността от цунами, чрез построяване на карти на очаквания максимален воден стълб на сушата в районите подлежащи на наводнения от цунами.

Таблица 3.1. Максимален наблюдаван магнитуд за изследваните цунамигенни източници.

	Цунамигенен източник	Максимален магнитуд	Историческо събитие	Литературни източници, Каталози
Зона 1	<i>Balchik</i>	>7.6	543 г.	[2]
Зона 1	<i>Kaliakra NE-SW</i>	7.2	1901 г.	[2,29]
Зона 1	<i>Kaliakra W-E</i>	7.2	1901 г.	[2,29]
Зона 2	<i>Turkey</i>	6.6	1968 г.	[3,5,6]
Зона 3	<i>Erzincan</i>	7.8	1939 г.	[5]
Зона 4	<i>Georgia</i>	>6.5	I в. сл. Хр.	[3,6,30]
Зона 5	<i>Caucasus</i>	6.0	1966 г.	[3,6,31]
Зона 7	<i>Crimea</i>	6.8	1927 г.	[6,30,32]
Зона 8	<i>Southern Crimea</i>	7.5/7.7*	1802 г.	[3,6,32]
Зона 8	<i>Western Crimea</i>	7.5/7.7*	1875 г.	[3,6,32]
Зона 9	<i>Shelf</i>	7.3*	1838 г.	[3,6,32]
Зона 19	<i>Kos</i>	6.6	2017 г.	[27,33,34]
Зона 19	<i>Rhodes</i>	7.2	1481 г.	[11]
Зона 19	<i>Karpathos I</i>	7.1	1948 г.	[35]
Зона 20	<i>South Cretan Sea</i>	7.1	1918 г.	[25,26]
Зона 20	<i>Gramvousa</i>	6.8	2013 г.	[25,26]
Зона 20	<i>Palaeochora Tympaki</i>	7.0	2008 г.	[25,26]
Зона 20	<i>Ptolemy Trench</i>	7.0	2009 г.	[25,26]
Зона 20	<i>WHA**</i>	8.3	365 г.	[11]
Зона 20	<i>EHA**</i>	8.0	1303 г.	[11]
Зона 21	<i>Akrotiri</i>	7.2	1201 г.	[11,25,26]
Зона 21	<i>Paphos</i>	7.4	1996 г.	[25,26]
Зона 22	<i>Latakia</i>	6.5	1408 г.	[14,25,26]
Зона 23	<i>Levantine</i>	7.5	1759 г.	[14,32,36]

* 2 хипотези: 1. източникът се намира при Вранча; 2. подводно свлачище. В симулациите $M=6,0$.

** *WHA* – Западна Елинска Дъга (West Hellenic Arc); *EHA* – Източна Елинска Дъга (East Hellenic Arc).

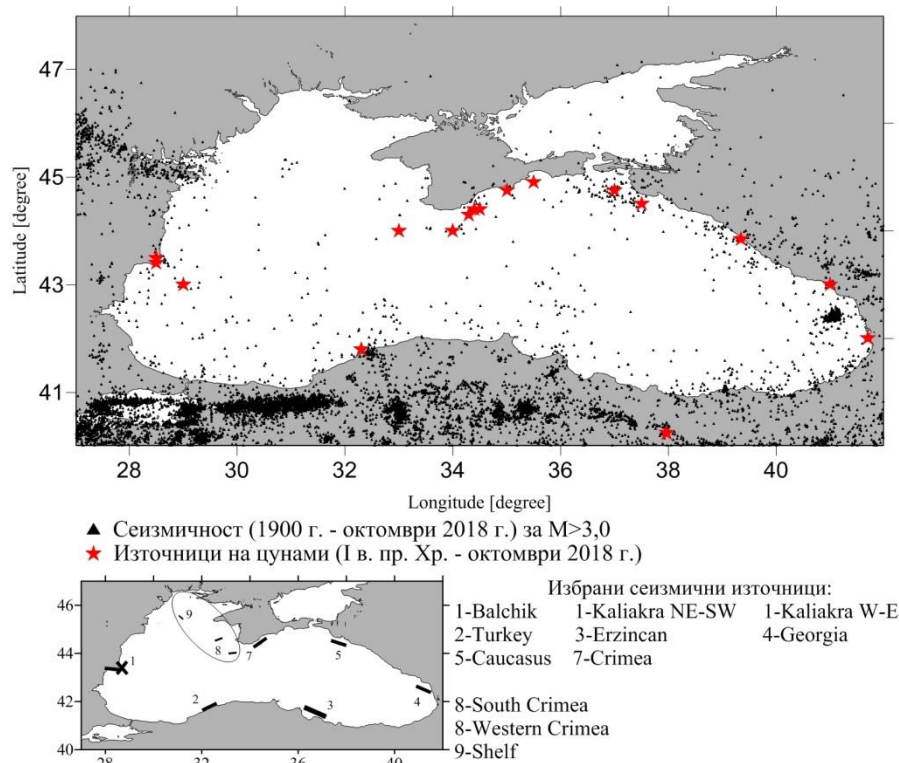
Таблица 3.2. Фокални механизми на моделираните събития за изследваните сеизмични източници.

	Strike [degree]	Dip [degree]	Rake [degree]	ФМ (схематично)
<i>Balchik</i>	100	60	290	
<i>Kaliakra NE-SW</i>	30	80	150	
<i>Kaliakra W-E</i>	300	80	26	
<i>Turkey</i>	238	62	76	
<i>Erzincan</i>	108	86	90	
<i>Georgia</i>	127	65	33	
<i>Caucasus</i>	117	78	89	
<i>Crimea</i>	50	50	270	
<i>Southern Crimea</i>	240	80	90	
<i>Western Crimea</i>	130	70	90	
<i>Shelf</i>	122	86	270	
<i>Kos*</i>	270	56	-94	
<i>Rhodes</i>	328	73	71	
<i>Karpathos I</i>	200	80	240	
<i>South Cretan Sea</i>	270	50	270	
<i>Gramvousa</i>	180	80	270	
<i>Palaeochora-Tympaki</i>	100	75	270	
<i>Ptolemy Trench</i>	75	65	270	
<i>WHA</i>	295	15	90	
<i>EHA</i>	268	48	71	
<i>Akrotiri</i>	300	30	90	
<i>Paphos</i>	48	77	170	
<i>Latakia</i>	209	75	85	
<i>Levantine</i>	17	30	90	

*симулациите са направени за 3 механизма, а този е избран за най- подходящ.

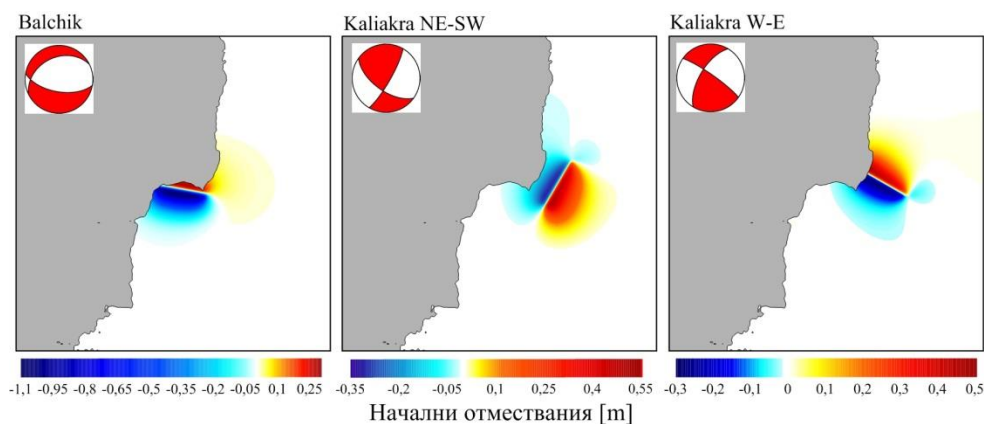
3.2. Сценарии в Черно море

Избрани са 8 цунамигенни зони в акваторията на Черно море, като за тях са изучени характеристиките на вълните цунами, както и тяхното влияние върху бреговата зона. Сеизмичността и източниците на наблюдавани цунами в района на Черно море са показани схематично на Фиг. 3.3. [27, 37]. На долния панел на същата фигура е представено разположението на моделираните сеизмогенни източници, като цифрите отговарят на разглежданите цунамигенни зони. Положението на правоъгълните елементи отговаря на средата на горната граница на разломяването.



Фиг. 3.3. Черно море: сеизмичност, източници на цунами, моделирани сеизмични източници.

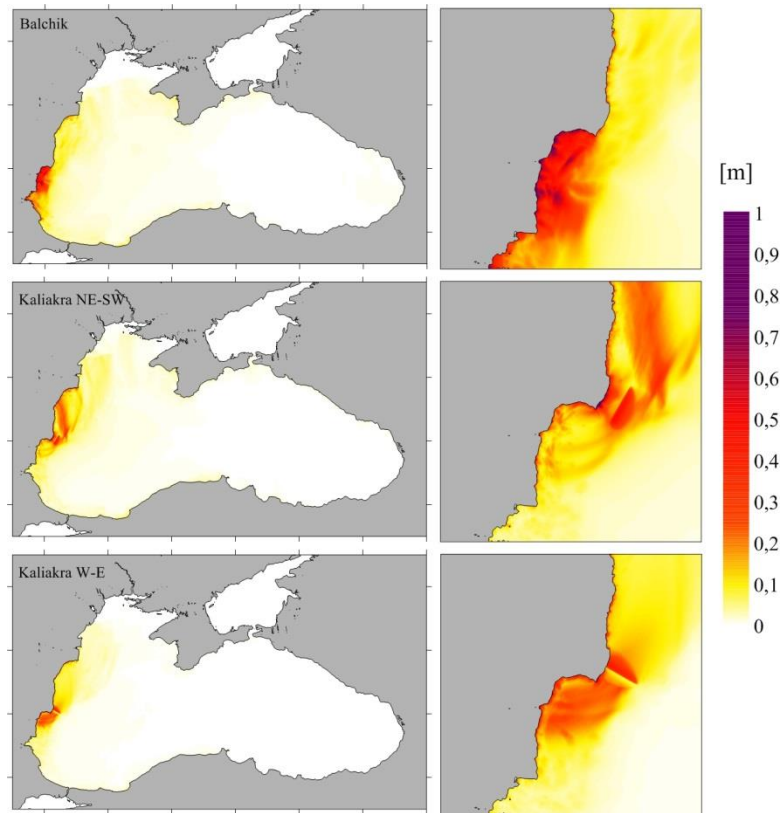
Зона 1. В Зона 1 са направени редица сценарии, като са избрани три различни положения на моделираните събития за сеизмична зона Шабла-Калиакра. Сеизмичните източници са именувани спрямо тяхното географско разпределение и ориентацията им: *Balchik*, *Kaliakra NE-SW* и *Kaliakra W-E*. В настоящия раздел ще разгледаме симулации на тези три източника с магнитуд $M=7,0$. Направени са симулации за същите събития с магнитуд $M=7,5$ и $M=8,0$, като резултати за тях са представени в **Раздел 4. Карти на опасността от цунами. Анализ на резултатите.** Геометричните параметри на трите сеизмични източника са: дължина – 33 km, ширина – 17 km, отместване по разлома – 2,2 m и дълбочина на горната граница на разломяването – 2 km. На Фиг. 3.4. схематично са представени фокалните механизми и първоначалните отмествания на водната повърхност.



Фиг. 3.4. Начални условия за разпространение на цунами и фокалните механизми на земетресенията в Зона 1.

На Фиг. 3.5. са представени полетата на максималните стойности на водната повърхност, като се забелязва, че разпределението на вълните цунами е съсредоточено

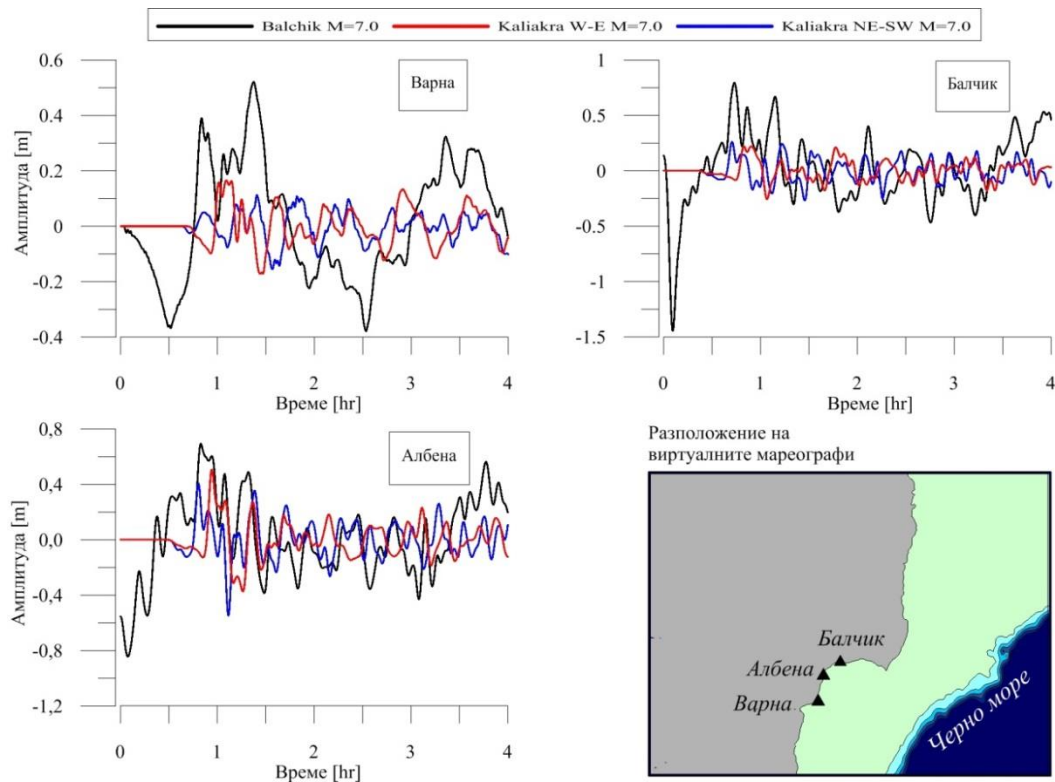
в западната част на Черно море. Източник *Balchik* допринася значително за положителните стойности на височините на вълните за Северното Българско Черноморие.



Фиг. 3.5. Поле на максималните височини на вълните. Панелите вдясно показват областта от североизточното крайбрежие на България.

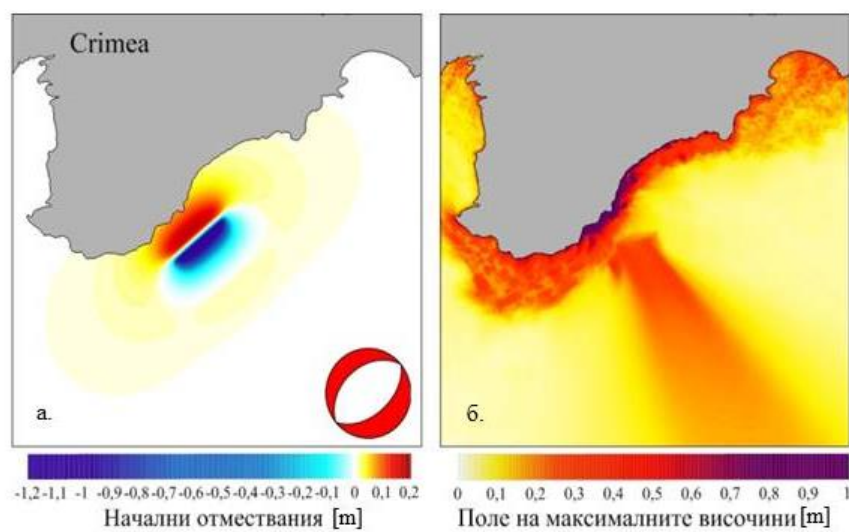
В 134 различни точки от бреговата зона на Черно море, близо до по-големите градове, са пресметнати синтетични мареограми. Те възпроизвеждат вариациите на морското ниво в зависимост от изминалото време след настъпилото земетресение. Избрани са няколко виртуални мареографа, разположени в близост до Варна, Балчик и Албена, в които да се пресметнат синтетичните мареограми. Фиг. 3.6. показва ефектите от генерираните вълни цунами, възникнали вследствие на сеизмичните източници в Зона 1, върху северната част на Българския бряг, както и тяхното местоположение. В черно, е обозначен източник *Balchik*, в червено – *Kaliakra W-E*, а в синьо – *Kaliakra NE-SW*. Максималната очаквана амплитуда на вълната за Варна е около 0,5 m, предизвикана от източник *Balchik*. Максималното отклонение на морската повърхност (-1,5 m, за $M=7,0$) в близост до пристанището на Балчик е генерирано от източник *Balchik*. Максималният отрицателен скок на височината при Албена е -0,8 m, като отново е вследствие на източник *Balchik*, докато другите два източника в същата зона генерират вълни в интервала от -0,5 до 0,5 m.

Направените симулации в Черно море са стартирани за време от 4 часа след земетресението. По този начин се обхващат и отразените вълни от крайбрежните зони, които в много случаи влияят значително на морското ниво. В заключение, за Зона 1, фокалният механизъм на източник *Balchik* е по-подходящ за индуцирането на вълни цунами, вземайки предвид също и че механизмите на другите два източника са приблизително отседни.



Фиг. 3.6 Синтетични мареограми за Варна, Балчик и Албена и тяхното местоположение.

Зона 7. Епицентърът на земетресението от 1927 г. е локализиран близо до континенталния склон, южно от Ялта с географски координати $34,4^{\circ}$ E и $44,4^{\circ}$ N, а магнитудът е оценен на $M=6,8$. Геометрията на източника е пресметната спрямо магнитуд 7, като дължината, ширината, отместването по разлома и дълбочината са съответно 33 km, 17 km, 2,2 m и 2 km. Началните условия за възникване на цунами са представени на Фиг. 3.7.а, като минималното отклонение е -1,1 m, докато положителната височина е значително по-малка, около 0,2 m. Полето на максималните височини, с увеличение върху п-в Крим, е показано на Фиг.3.7.б.

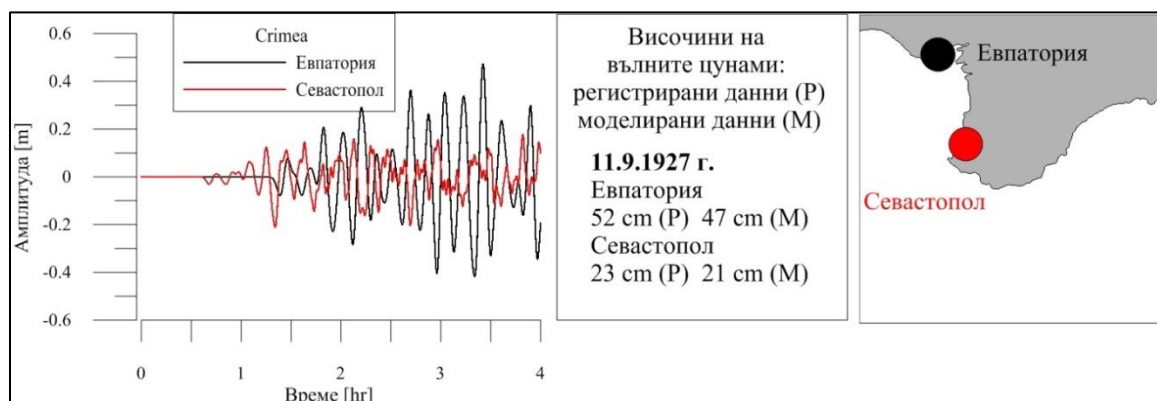


Фиг. 3.7. Начални условия за разпространение на цунами (а) и поле на максималните височини (б).

По-голямата част от енергията на вълните е съсредоточена в източната част на Черно море, като полуостров Синоп (Турция) е достигнат от вълните в рамките на 40

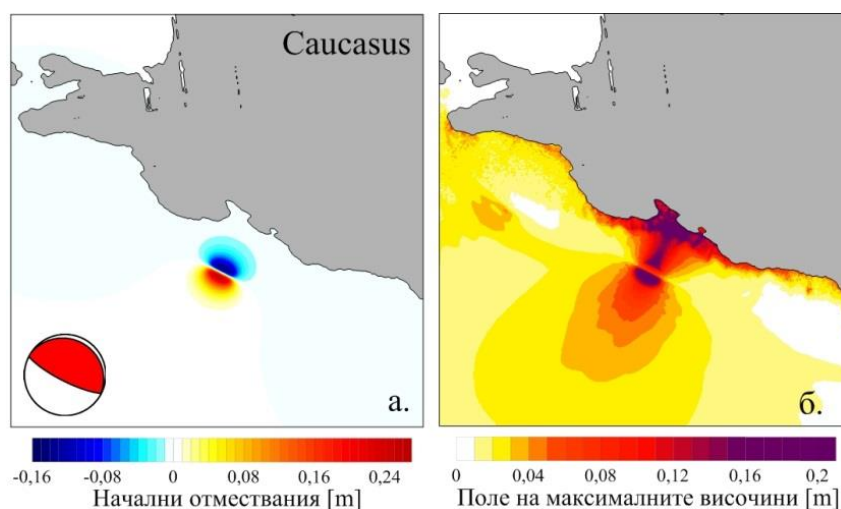
min, където височините на вълните достигат 0,25 m. Механизмът на земетресението, допринася за големите положителни амплитуди изчислени за Ялта, около и над 1 m, като в някои определени точки в източната част на Крим достигнатите височини надхвърлят 3 m.

Данни за регистрираните през 1927 г. вълни цунами, са представени в трудовете на *Dotsenko* [9,38]. Резултатите представени по долу са сравнени с данните от мареографската мрежа. Две синтетични мареограми, с продължителност от 4 часа, са изчислени за западната част на Крим. Необходими са повече от 30 min за достигане на първата вълна до избраните точки. Резултатите от симулациите имат добро съвпадение с регистрираните амплитуди. Изчислените височини на вълните цунами се различават от наблюдаваните с 2 до 5 cm за Севастопол (приблизително 0,5 m) и Евпатория (приблизително 0,2 m), съответно (Фиг. 3.8.).



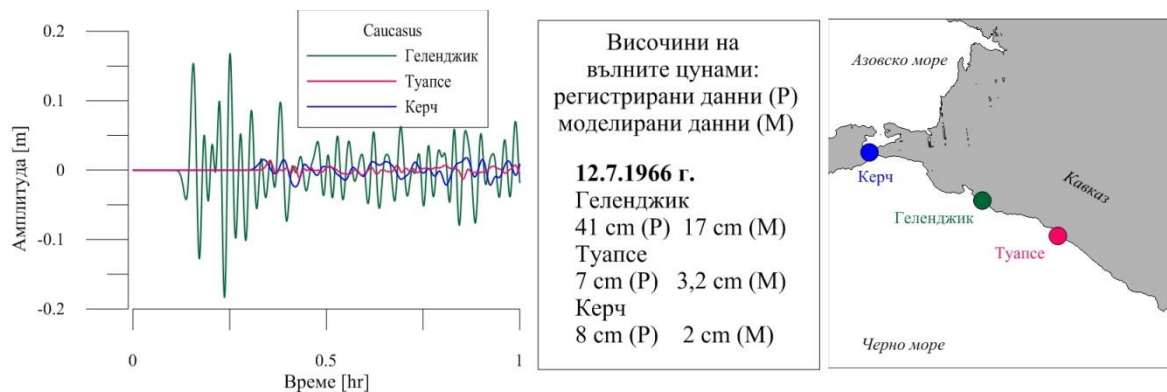
Фиг. 3.8 Синтетични мареограми за източник *Crimea* в Зона 7 (ляв панел). Сравнение между резултатите от симулациите и регистрираните данни. Разположение на виртуалните мареографи (десен панел).

Източник *Caucasus* (Зона 5). Подводното земетресение от 1966 г. с епицентър южно от Анапа е с магнитудът $M=6,0$ и с геометрични параметри на разломяване, съответно: 13 km – дължина, 9 km – ширина и 0,75 m отместване по разломната повърхност. Избраната дълбочина за горна граница на източника е 2 km. Началните условия и максималните височини са представени на Фиг. 3.9. Разпространението е съсредоточено основно в залива между Новоросийск и Геленджик. Максималните моделирани амплитуди на вълните са близки до 0,2 m, докато наблюдаваните в Геленджик, достигат 0,41 m.



Фиг. 3.9. Източник *Caucasus*: а. начални условия за разпространение на цунами; б. поле на максималните височини.

Синтетичните мареограми, изчислени в Геленджик, Туапсе и Керч, показват значително подценяване на регистрираните вълни цунами (Фиг. 3.10.). Данни за регистрираните амплитуди са взети от [9,38]. Разликите най-вероятно се дължат на различия между реалния и предполагаемия фокален механизъм на земетресението.



Фиг. 3.10. Синтетични мареограми за източник *Caucasus* в Зона 5 (ляв панел). Сравнение между резултатите от симулациите и регистрираните данни. Разположение на виртуалните мареографи (десен панел).

Направено е и детайлно моделиране на вълни цунами за североизточното крайбрежие на България, използвайки две вградени мрежи (Мрежа 2 и Мрежа 3). Симулациите са на база източници в Зона 1, с магнитуд $M=7,5$. Построени са полетата на първоначалните отмествания, полетата на максимални височини на морската повърхност и полетата на максималната скорост на частиците в целия обем, които са от голям интерес при изследването на вълните цунами, тъй като в близост до плитките райони те нарастват, докато в дълбоките води са пренебрежимо малки. Представените синтетични мареограми, разположени между н. Калиакра и Варна, показват малкото време за евакуация на населението, особено за населените места от Албена на север.

Извършените симулации и получените резултати за останалите зони в Черно море са разгледани подробно в дисертацията в Глава 3., раздел 3.2.

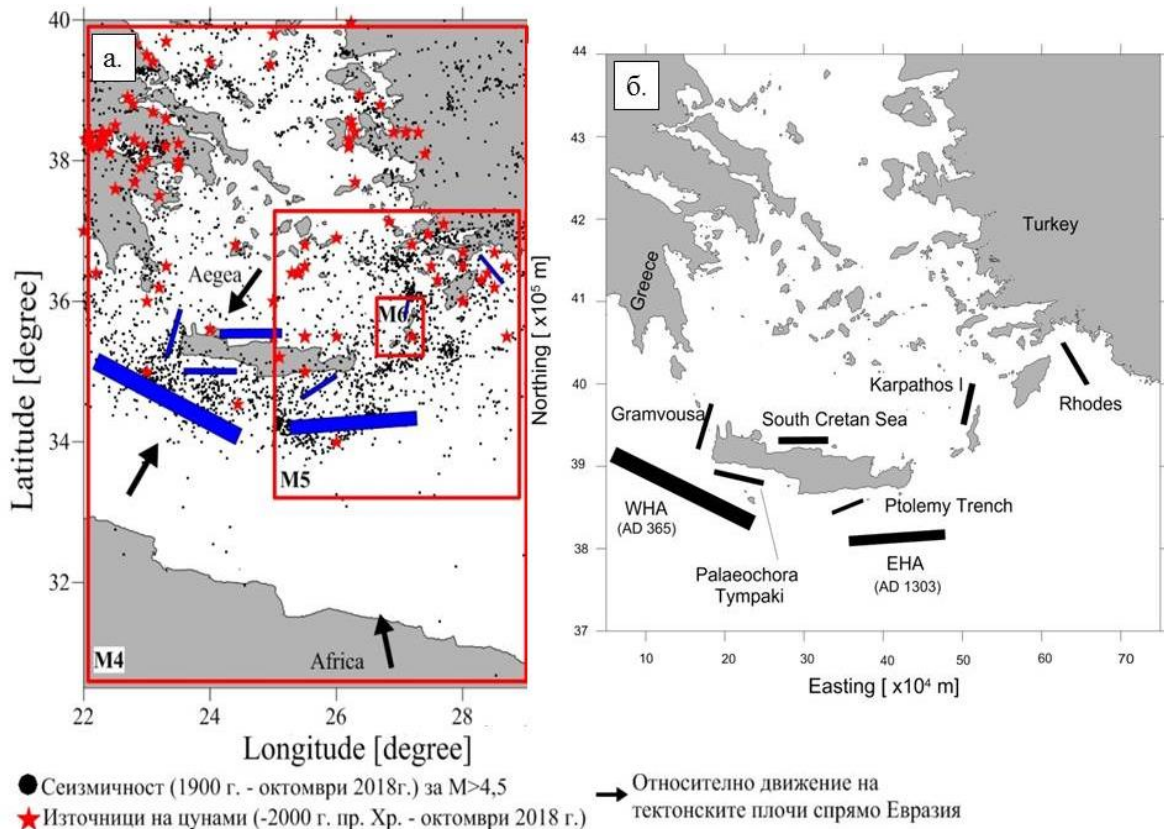
3.3. Сценарии в Егейско море

Зони 19 и 20. Моделирането е извършено в южната част на Егейско море, т.к. за северната част се изисква по-детайлна батиметрия, поради спецификата на релефа. Реконструирани са две от най-големите исторически събития на вълни цунами в цялото Средиземноморие, чиито магнитуд е над 8,0. Оценено е влиянието на генерираните вълни цунами върху крайбрежните райони, тъй като те са съпоставими със земетресението и последвало цунами близо до Суматра на 26 декември 2004 г. Допълнително са избрани и моделирани шест различни цунамигенни зони близо до островите Крит и Родос, за да се оценят максималните амплитуди и времето на пристигане на вълните цунами. За всички сценарии е моделиран правоъгълен сеизмичен източник, способен да генерира земетресение с магнитуд равен или по-голям на регистрирания в исторически план магнитуд. Числените симулации са извършени върху Мрежа 4, а сеизмичността, източници на цунами в миналото, както и относителното движение на тектонските плочи е представено на Фиг. 3.11.а. В Таблица 3.3. са представени сеизмичните източници, избраният магнитуд и геометрията на разломите. Разположението и имената на всички осем цунамигенни сеизмични източника са представени на Фиг. 3.11.б, като се има предвид, че ширината на разломите не е в мащаб спрямо дължината.

Таблица 3.3. Геометрични параметри на сеизмичните източници.

Зони 19 и 20	Lon/Lat	M_w	H [km]	L [km]	W [km]	D [m]
<i>WHA AD 365</i>	23.0, 35.0	8.3	5	200	80	9
<i>EHA AD 1303</i>	26.1, 34.5	8.0	4	125	50	6
<i>Gramvousa</i>	23.5, 35.5	6.8	2	25	14	2
<i>PaTy</i>	24.0, 35.2	7.0	2	33	15	2.5
<i>PT</i>	25.3, 34.8	7.0	2	33	17	2.5
<i>SCrS</i>	24.8, 35.5	7.1	2	40	19	2.7
<i>Karpathos I</i>	27.1, 35.9	7.0	2	33	17	2.5
<i>Rhodes</i>	28.7, 36.4	7.3	3	50	23	3.2

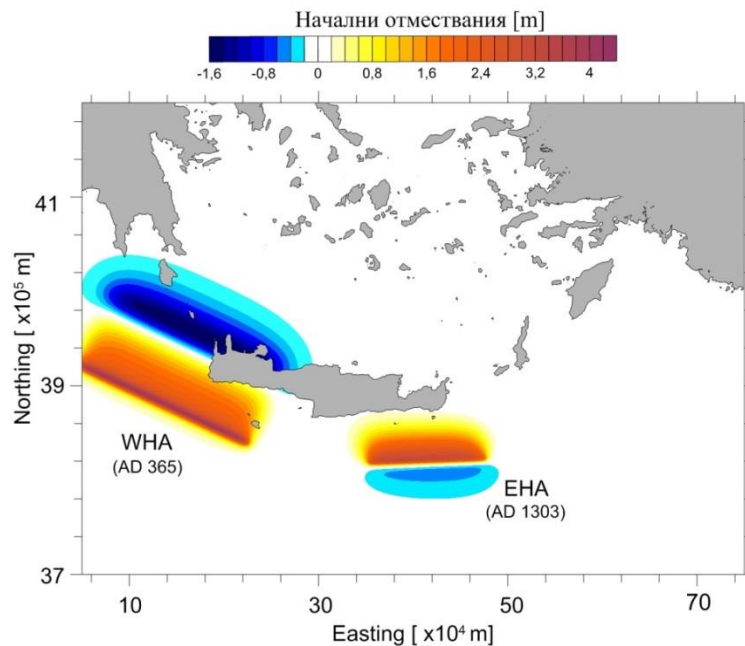
WHA – Западна Елинска Дъга (West Hellenic Arc); *EHA* – Източна Елинска Дъга (East Hellenic Arc); *PaTy* – Palaeochora Tympaki; *PT* – Ptolemy Trench; *SCrS* – South Cretan Sea;



Фиг. 3.11. Егейско море: а. сеизмичност, източници на цунами, използвани мрежи.; б. моделирани източници.

Източници WHA, EHA. Началните условия за генериране на вълни цунами свързани със земетресението от 365 г. ($M=8,3$) и от 1303 г. ($M=8,0$) са представени на Фиг. 3.12., като се има предвид, че цунамигенните източници са с възседен произход и ориентирани почти паралелно на Елинската субдукционна зона. Такъв тип източници създават деформации на океанското дъно, които се характеризират с големи издигания, в случая близо до югозападната и югоизточната части на о. Крит. Максималните

първоначални отмествания на морското дъно за източник *WHA* са изчислени в диапазона -1,6 и 4,1 m, докато за *EHA* те са в интервала -0,4 и 3,3 m.



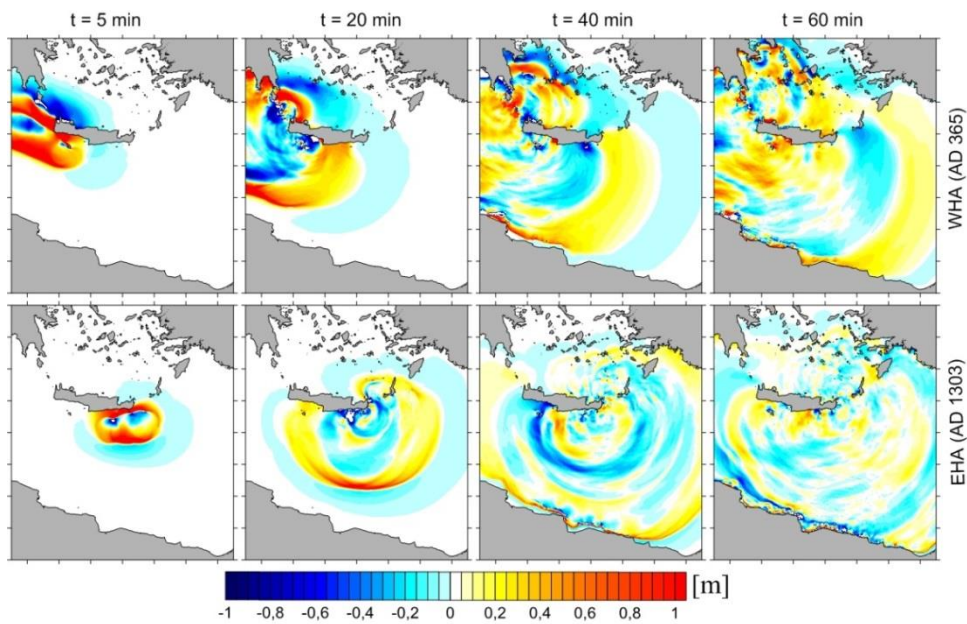
Фиг. 3.12. Начални условия за генериране на вълни цунами за земетресенията от 365 г. и 1303 г.

Полето на разпространението на вълните цунами е представено за 5, 20, 40 и 60 min след възникване на вълните цунами. Снапшотите за двете ключови събития, са показани на Фиг. 3.13. Горният панел илюстрира ефектите от 365 г., показвайки, че само 5 min след земетресението, образувалите се положителни вълни цунами достигат югозападните брегове на Крит, островите Китира и Гавдос. Вълните цунами се разпространяват в югозападна посока, достигайки Либия и Йонийско море. Повечето от малките острови на север от Крит са атакувани от вълните за по- малко от 40 min. Един час след земетресението и настъпилото цунами, полуостров Пелопонес и цялото южно Егейско море са засегнати от вълните. Долният панел на Фиг. 3.13. илюстрира ефектите от 1303 г., като за по-малко от 5 min югоизточните брегове на Крит са достигнати от вълните. След 20 min о. Карпатос е засегнат, както и югозападните брегове на Крит. Турският и Либийският брегове са достигнати от положителните амплитуди на вълните за 40 min. В рамките на един час след земетресението, по-голямата част от Източното Средиземноморие, включително Александрия и Кипър, са засегнати. И двете събития се смятат за най-големите исторически цунами в региона, генерирани от сеизмични източници.

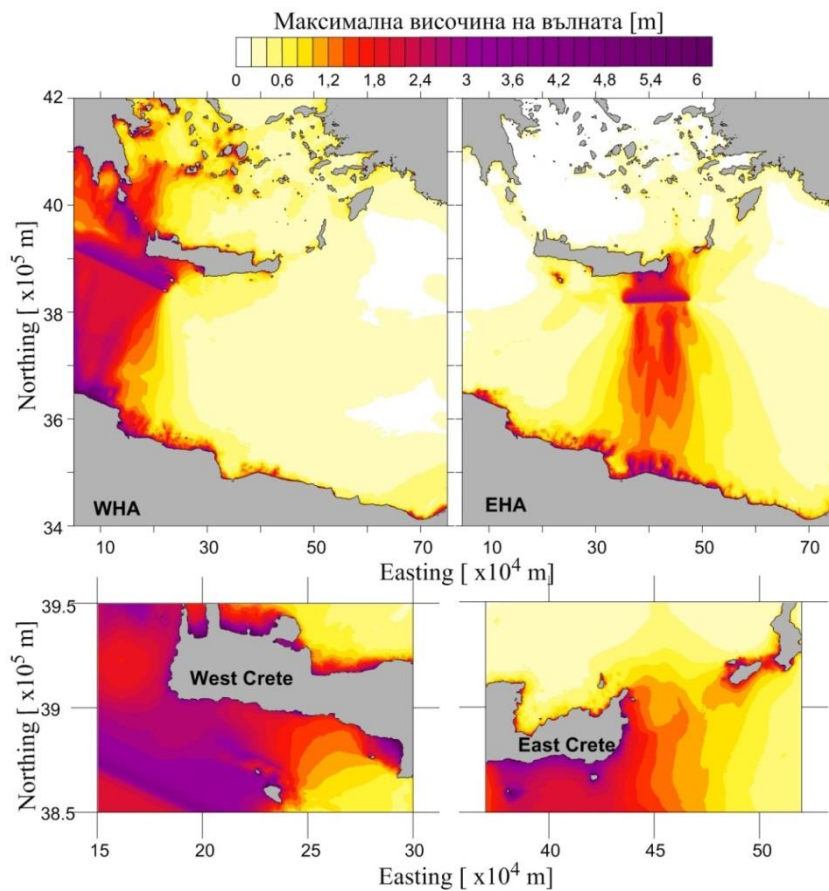
Построяването на полетата на максималните височини на вълните цунами са едно добро представяне и тълкуване на количеството освободена енергия и посоката на разпространение. Фигура 3.14. ясно илюстрира зоните, които са най- засегнати от вълните цунами.

Избрани са 38 точки в района на Егейско море, в които да се изчислят синтетични мареограми. За цунамигенните източници *WHA* и *EHA* са избрани 4 точки в различни зони, за да се оцени влиянието на вълните цунами от двата източника: Санторини, Панормос, Аркаса (Карпатос) и Хераклион. Генерираният сигнал и разположението на виртуалните мареографи е показано на Фиг. 3.15. Представените мареограми отразяват колебанията на морското ниво 1 час и 40 минути след настъпилото земетресение. Максималните амплитуди за столицата Хераклион се

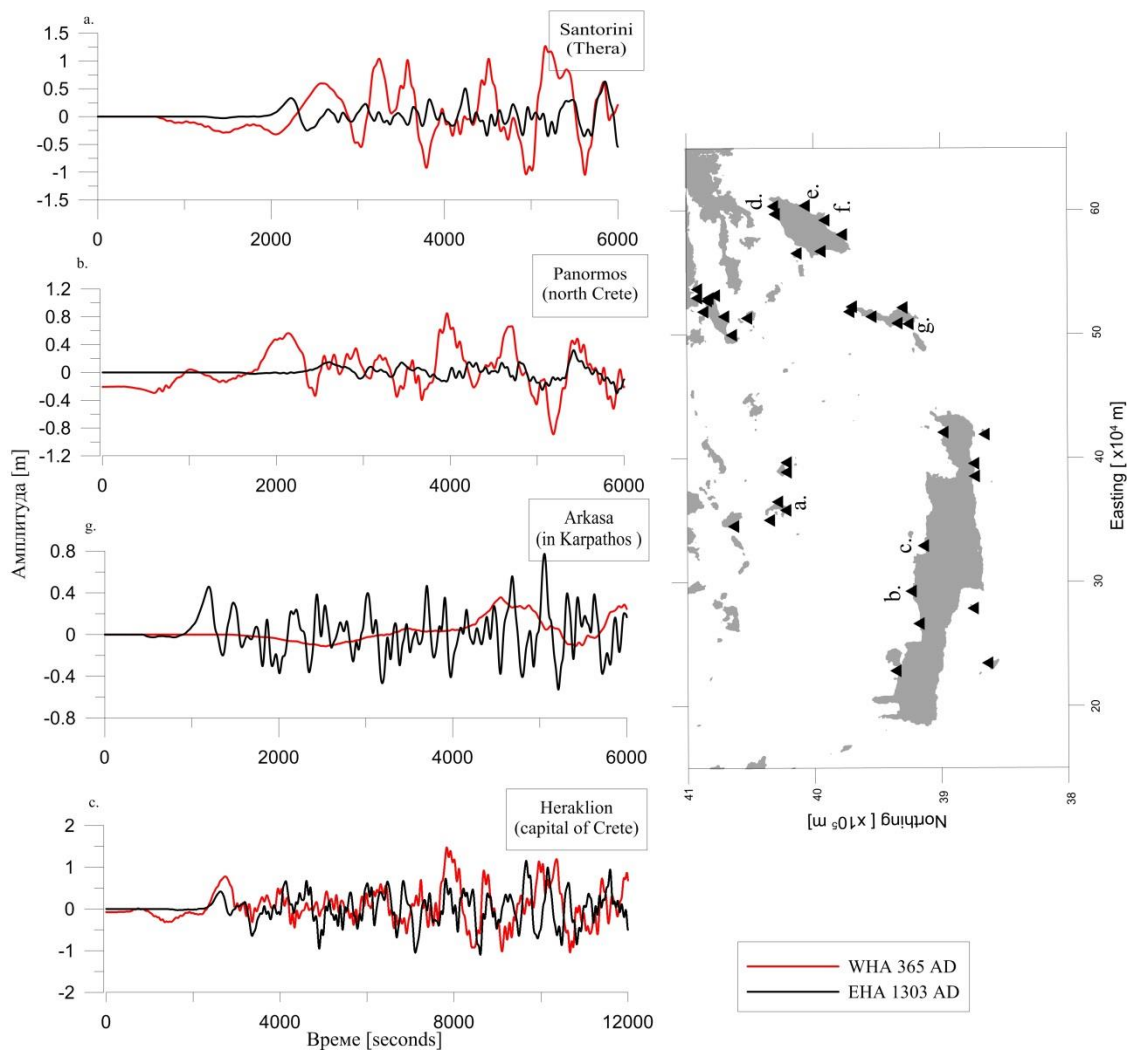
наблюдават след първите 6000 s, затова представеният сигнал на мареограма (c) има продължителност 3 часа и 10 минути след земетресението. В Таблица 3.4. са обобщени получените максимални амплитуди на генерираните вълни за четирите избрани мареограми.



Фиг. 3.13. Поле на разпространение за цунамигенни източници *WHA* и *EHA*.



Фиг. 3.14. Максимални положителни височини на вълните цунами, генерирани от *WHA* и *EHA*. На долните панели са увеличени западната и източната част на о. Крит.



Фиг. 3.15. Синтетични мареограми, изчислени за двете реконструирани събития от 365 г. и 1303 г.

Таблица 3.4 Максимални и минимални колебания на вълните цунами в метри, изчислени от четирите мареограми.

	Санторини	Панормос	Аркаса	Хераклион
<i>WHA 365 AD</i>	-1,17/+1,37	-0,89/+1,24	-0,37/+0,38	-1,4/+1,6
<i>EHA 1303 AD</i>	-0,80/+0,75	-0,38/+0,40	-0,53/+0,77	-1,1/+1,2

Резултати за останалите 6 сеизмични източника, чиито характеристики са описани в Таблица 3.3., са систематизирани и представени в дисертацията. Първоначалните отмествания на водната повърхност, причинени от тези сеизмични източници са в интервала -1,5 и 1,5 m, като максималното отместване е причинено от източник *Rhodes*, докато отрицателните спадове възникват вследствие на източник *South Cretan Sea*. Морфологията под южната част на Егейско море е много сложна, затова разпространението е значително по-слабо. Ефектите се наблюдават близо до източниците като се локализират в отделни ограничени области. Поради множеството острови в Егейско море, вълните цунами дифрактират. Моделираните разломявания са разположени изключително близо до бреговете на посещавани туристически острови, което прави крайбрежните градове уязвими от наводнения вследствие на цунами и то в много кратък период от време след настъпилото земетресение.

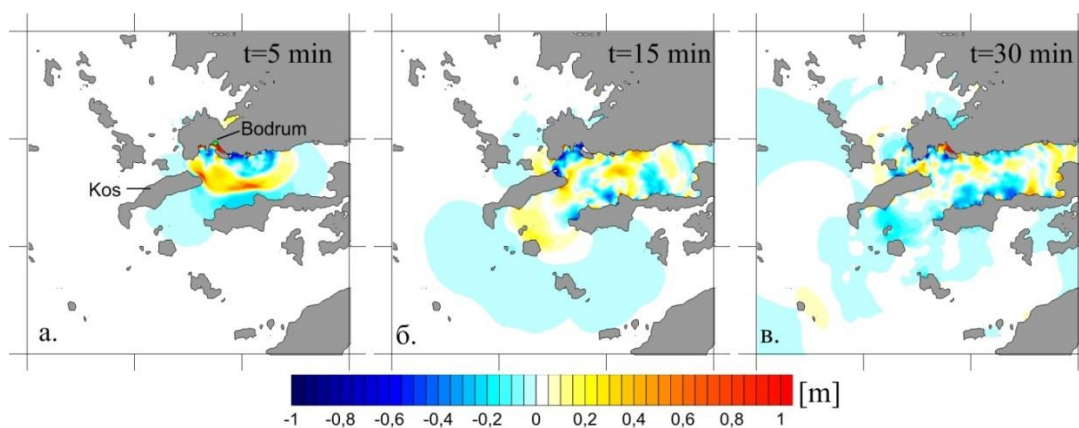
3.3.1. Числено моделиране на вълните цунами от земетресението на 20 юли 2017 г. ($M_w=6,6$) в Бодрум-Кос, Егейско море

Тази част от дисертацията е фокусирана върху моделирането на вълни цунами в Егейско море, предизвикани от силното земетресение ($M_w=6,6$) на 20 юли 2017 г., в близост до о. Кос. Този Гръцки остров е разположен само на 4 km от Турското крайбрежие и от гр. Бодрум, който претърпя значителни загуби вследствие на вълните цунами – две жертви и щети по инфраструктурата, както и наводнения в пристанищните зони на о. Кос и п-в Бодрум. Вълните цунами са регистрирани инструментално от мареографската мрежа. Според различните агенции, механизмите варират, поради което са тествани три конфигурации на механизма по данни от GFZ и GCMT. В Таблица 3.5. са представени избраните фокални механизми и тяхното схематично изобразяване. В направените симулации, избраните дължина и ширина на сеизмичния източник са съответно 33 km и 17 km. Пресметнатото отместване по разломната повърхност е 2,5 m, а дълбочината на горната граница на разломяване е 1000 m.

Таблица 3.5. Решения на фокалните механизми по данни от GFZ и GCMT.

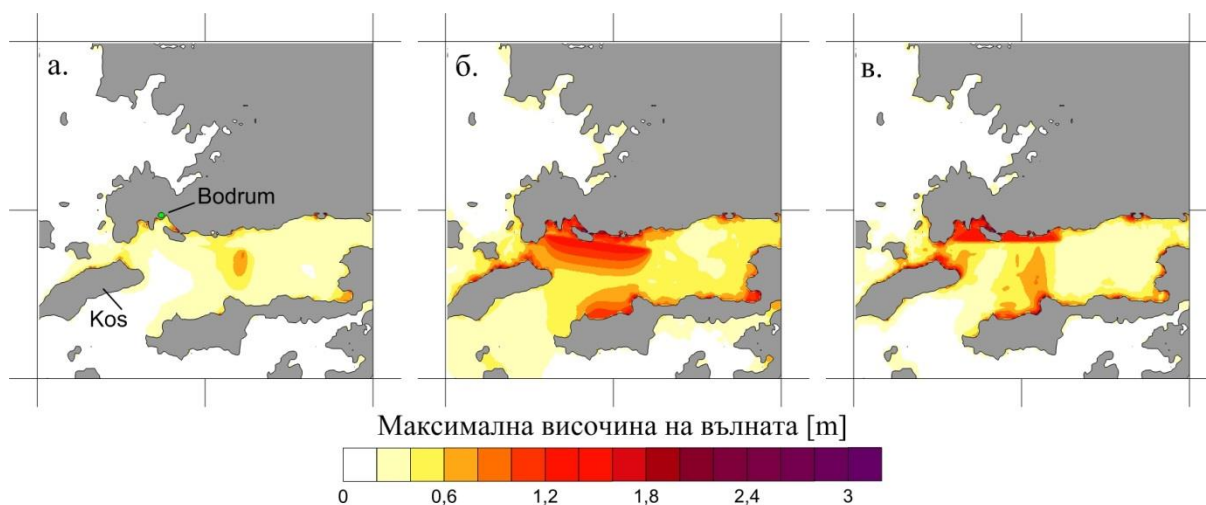
Фокален механизъм	ФМ 1	ФМ 2	ФМ 3
Strike (degree)	98	98	270
Dip (degree)	35	35	56
Rake (degree)	16	-82	-94

Разпространението на вълните цунами е представено чрез снимки за 5, 15 и 30 min след земетресението, като на Фиг. 3.16. са визуализирани резултатите за фокален механизъм 3 (ФМ3). Забелязва се, че източният бряг на о. Кос е засегнат от цунамито между 5 и 15 min след земетресението. Според измерванията, направени на о. Кос, първата положителна вълна пристига 13 min след земетресението [33], което е доста добро съвпадение с резултатите от моделирането. Оценка за максималните моделирани амплитуди е направена и за трите фокални механизма, като стойностите от ФМ2 и ФМ3 са в добро съвпадение с инструментално регистрираните и наблюдавани височини на цунамито, ФМ1 дава занижени стойности спрямо регистрираните, вероятно поради отседния характер на фокалния механизъм. (Фиг.3.17.).



Фиг.3.16. Поле на разпространението на вълните цунами за ФМ3.

В Таблица 3.6. е представено сравнение между моделираните максимални стойности и измерените такива, близо до Акиарлар, Бодрум и пристанището на Кос. Синтетичните мареограми са представени на Фиг. 3.18.



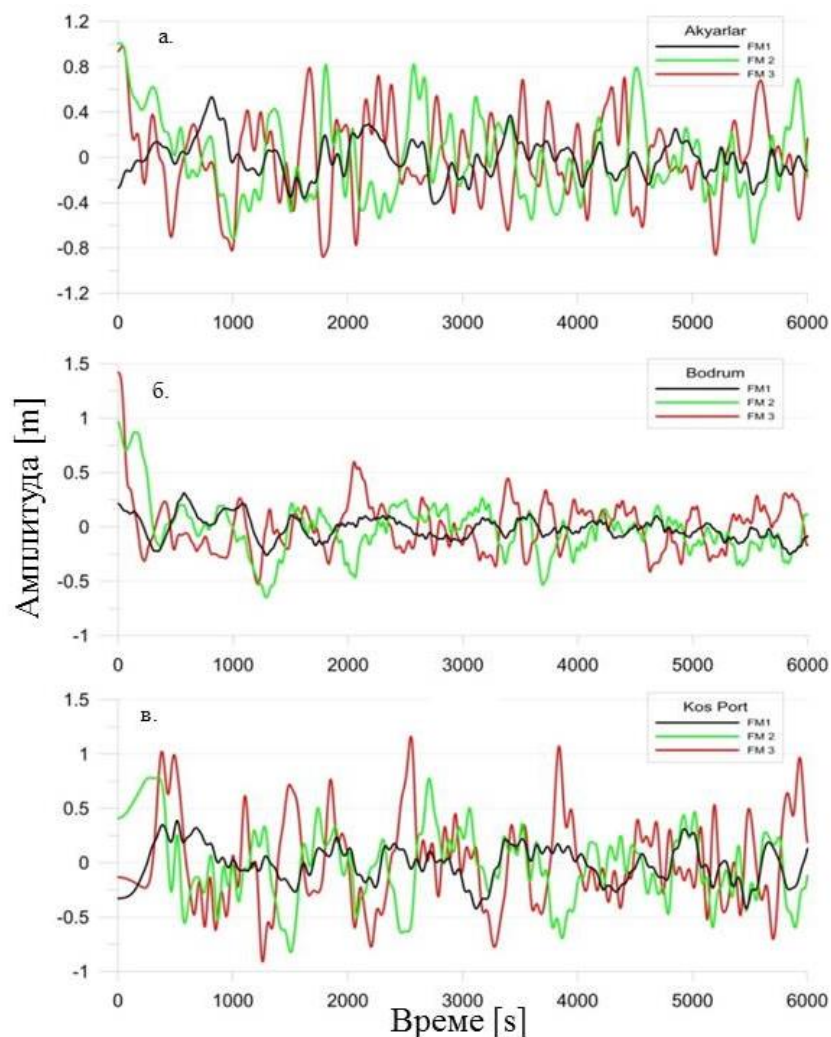
Фиг.3.17. Максимални амплитуди на вълните: а. ФМ1; б. ФМ2; в. ФМ3.

Таблица 3.6. Сравнение между регистрираните височини и моделираните стойности.

	Измерена височина [m]	ФМ 1 [m]	ФМ 2 [m]	ФМ 3 [m]
Бодрум	0,5-1,9	0,3	0,95	1,4
Пристанище Кос	1,4-1,5	0,45	0,75	1,25
Акиарлар	1,2	0,5	1,02	0,92

Цветовете на трите графики отговарят съответно на трите различни фокални механизма: ФМ1 – черно, ФМ2 – зелено и ФМ3 – червено. Мареограмите представят колебанията на морското ниво за първите 6000 s след земетресението. Инструменталните измервания в залива на Бодрум показват стойности от 1,9 m над морското ниво. Изчислените максимални амплитуди за ФМ3 са 1,4 m, което показва добро съответствие, въпреки относително голямата стъпка на мрежата и не толкова детайлната батиметрия. Пресметнатите стойности на височините на вълната за ФМ2 близо до Акиарлар са 1,02 m, докато инструментално измерените там са 1,20 m. Изчисленията за ФМ3 в Акиарлар показват амплитуди 0,95 m. Най- добро съответствие между измерените и симулираните стойности има за ФМ3 в пристанището на Кос , като отклоненията на моделираните височини спрямо наблюдаваните са 0,25 m. Както се забелязва от синтетичните мареограми, времето за евакуация на населението в Бодрум и източната част на о. Кос е изключително малко.

Въпреки различията между предложените фокални механизми, резултатите от числените симулации показват добро съвпадение с регистрираните или измерени на място височини, на наблюдаваните вълни цунами. По-детайлна информация за батиметрията в района, ще допринесе за още по-добри резултати.



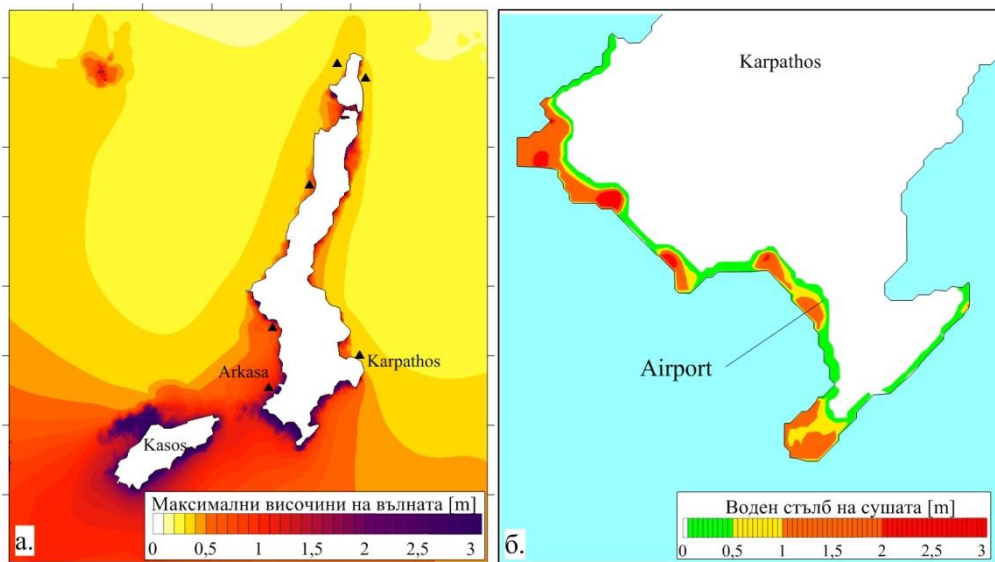
Фиг. 3.18. Синтетични мареограми за Акиарлар, Бодрум и пристанище Кос.

3.3.2. Влияние на вълните цунами върху о. Карпатос, генерирани от земетресението през 1303 г.

В тази част от дисертацията е направено детайлно изследване на вълните цунами, генерирани от сеизмичен източник, моделиращ земетресението от 1303 г., наречен по-горе *ЕНА* (East Hellenic Arc). Събитието е моделирано в Глава 3., раздел 3.1., но тук е направена оценка на влиянието на този източник върху о. Карпатос. Симулациите са извършени върху две мрежи (Мрежа 5 и 6), като втората е вградена в първата. Моделиране на това събитие, със специално внимание на влиянието върху о. Карпатос до момента не е правено. Остров Карпатос се намира североизточно от о. Крит, като е заобиколен от редица разломни структури, способни да генерират земетресения с магнитуд $M > 7,0$, като земетресението през 1948 г., когато магнитудът е оценен на $M = 7,1$, а последвалите вълни цунами надвишават 7 m [39].

Резултатите, представени в раздел 3.3, показаха нагледно накъде е съсредоточена основната енергия на генерираните вълни цунами. Не малка част от този поток е насочен в посока о. Карпатос. Максималните изчислени амплитуди, определени от моделирането на вълните цунами са представени на Фиг. 3.19.а. Ясно се забелязва, че южната част на острова е изложена на по-големи височини на вълните, надвишавайки 3 m, докато в северната част на острова максималните височини варират

между 0,8 и 2 m. Отчитайки по-добрата разделителна способност от 100 m, както и включването на нелинейността в изчисленията, е построена карта на очакваните наводнени райони (Фиг. 3.19.б). За южната част от острова, където се намира летището на Карпатос, е представено количеството воден стълб на сушата. Резултатите показват стойности между 1 и 2 m в близост до летището. В тази част на острова бреговете не са стръмни и е логично да очакваме наводнения, причинени от цунами.

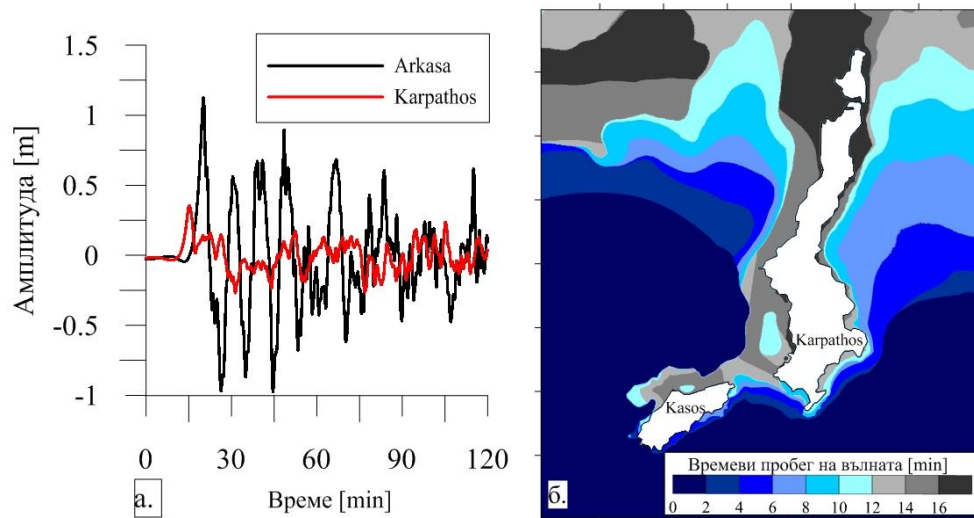


Фиг. 3.19. Ефекти от земетресението през 1303 г. върху о. Карпатос: а. поле на максималните изчислени височини на вълните; черните триъгълници посочват точките, в които са пресметнати синтетични мареограми; б. максимален воден стълб на сушата, увеличено за района на летището.

Представените синтетични мареограми за о. Карпатос са с дължина на записа от 2 часа (Фиг. 3.20.а), а тяхното местоположение е отбелязано на Фиг. 3.19.а. Моделираните осцилации на водната повърхност за град Аркаса варират в интервала - 0,98 и 1,12 m, докато амплитудите на цунами за град Карпатос са значително по-малки, от -0,27 до 0,35 m. Времето на пристигане на вълните цунами е оценено и визуализирано на Фиг. 3.20.б. Поради близко разположения цунамигенен източник, времето за евакуация на населението е изключително малко. За района на летището оцененото време е под 10 min. За Аркаса времето за евакуация е между 12 и 14 min. Интересно е да се отбележи, че по-голямата част от западната страна на острова, остава в сянка от първоначалната разпростираща се енергия на вълните цунами, тъй като малкият остров Касос, разположен югозападно от Карпатос, играе ролята на частична бариера. Влиянието върху Касос не е взето предвид, поради слабата населеност и наличието на планински масиви по протежението на острова.

Както бе споменато, о. Карпатос е заобиколен от няколко разломни структури включени в базите данни на *SHARE* и *GreDaSS* [25,26]. Направените числени симулации в Глава 3, раздел 3.3.2 за източник *Karpathos I*, показват незначително влияние върху южната и източната части на острова, в сравнение с очакваните ефекти от моделираното земетресение, предизвикало цунами през 1303 г. Независимо, че избраният източник *EHA* е разположен по-далеч от о. Карпатос, потенциалната опасност от наводнения на острова е висока. Поради спецификата на релефа на морското дъно, са възможни източници на цунами с комбиниран механизъм – земетресение и последвало свлачище, което би усилило височината на вълните цунами, каквато е една от хипотезите за амплитудите на вълните цунами през 1948 г. [39]. Ако не се отчитат допълнителни ефекти от подводни свлачища вследствие на земетресения,

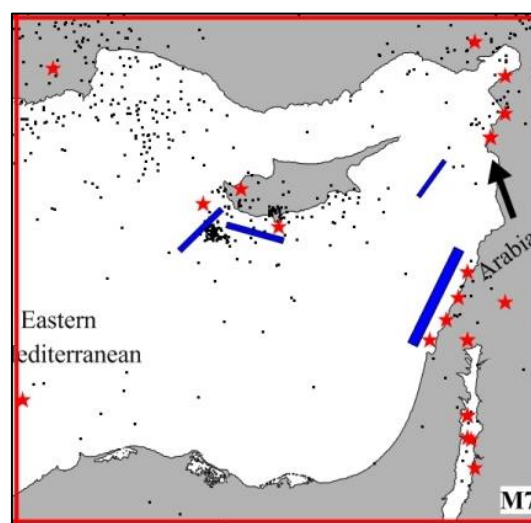
може да се обобщи, че източник *ЕНА* има най-висок потенциал за генериране на цунами, който би повлиял сериозно върху о. Карпатос.



Фиг. 3.20. Синтетични мареограми за о. Карпатос (а); време на пристигане на вълните цунами до о. Карпатос (б).

3.4. Сценарии в Източното Средиземноморие

Зони 21, 22 и 23. В най- източната част на Средиземно море са избрани три цунамигенни зони, в които са моделирани четири сеизмични събития, генериращи цунами. Две от разгледаните разломявания (*Akrotiri, Paphos*) се намират в югозападната част на о. Кипър, недалеч от брега. Третият сеизмичен източник (*Latakia*) се намира по протежението на Латакийския хребет, източно от о. Кипър и простиращ се до най-западните брегове на Сирия. Последният избран източник (*Levantine*) е разположен почти паралелно на бреговете на Ливан и Израел, следвайки изобатите. Фокалните механизми на събитията са с доминиращ възседен характер, с изключение на източник *Paphos*, който е от отседен тип. Симулациите са извършени върху Мрежа 7 и за време от над 4 часа. Разположението на моделираните сеизмични източници е показано на Фиг. 3.21.



Фиг. 3.21. Разположение на моделираните източници. Със звездички са отбелязани източници на вълни цунами в миналото, а с черни точки - сеизмичността в района, за $M > 4.5$.

В Таблица 3.7. са представени параметрите на правоъгълните елементи. Първоначалните вертикални отмествания на морското дъно са изчислени в интервала -0,3 m до 1,6 m, като максималните положителни височини се наблюдават при сеизмични източници *Akrotiri* и *Levantine*, докато максималното отрицателно отклонение и за четирите събития е приблизително еднакво, вариращо от -0,28 m до -0,22 m.

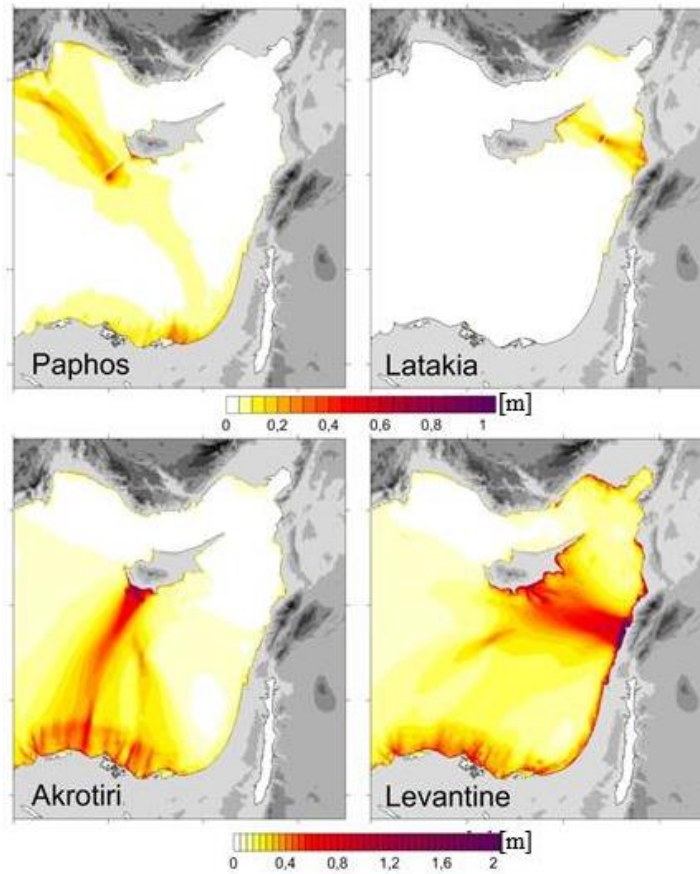
Таблица 3.7. Геометрични параметри на сеизмичните източници.

Зони 21, 22, 23	M_w	H [km]	L [km]	W [km]	D [m]
<i>Akrotiri</i>	7.2	3,5	45	20	3,0
<i>Paphos</i>	7.4	3,0	56	26	3,5
<i>Latakia</i>	6.5	2,5	17	10	1,5
<i>Levantine</i>	7.5	4,0	65	30	4,0

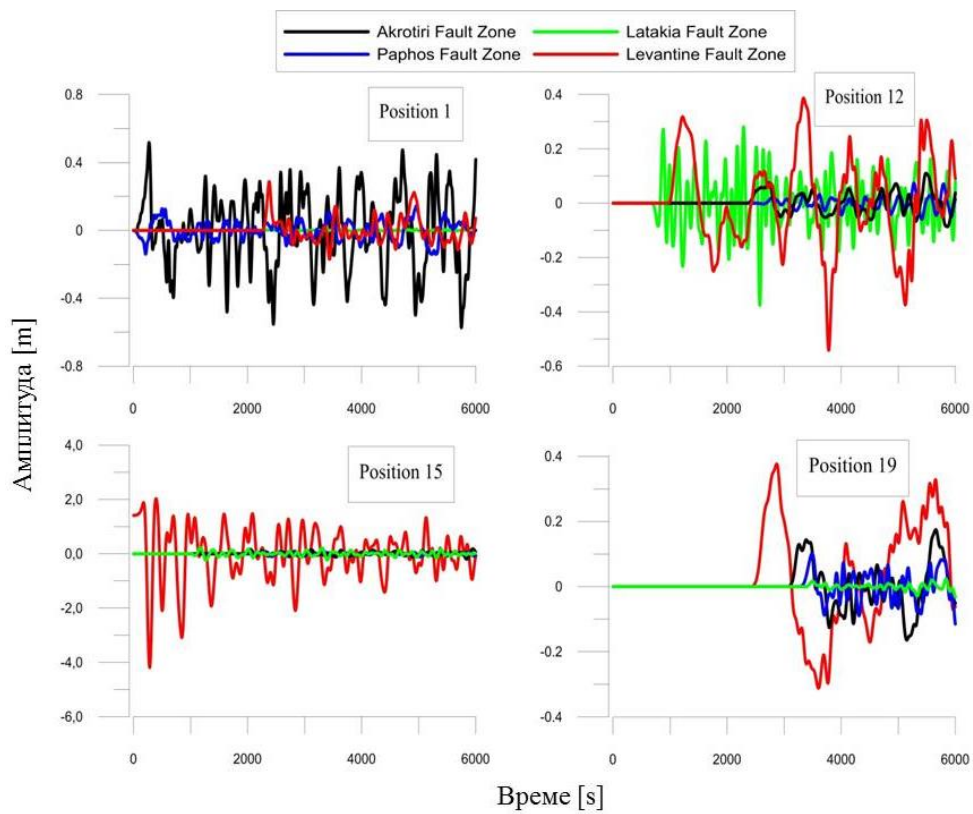
Максималните изчислени стойности на височините на моделираните вълни цунами за четирите източника са илюстрирани на Фиг. 3.22. Голяма част от енергията на източник *Paphos*, преминава на северозапад, посока Турското крайбрежие, останалата част е съсредоточена в посока югоизток, достигайки залива между Порт Саид и Тел Авив. Източник *Latakia* въздейства предимно на зоната по западното крайбрежие на Сирия и части от североизточен Кипър. Максималните стойности за двата източника достигат до 1 m. Максималните отклонения за източници *Akrotiri* и *Levantine* надвишават 2 m. Изчислените максимални височини за източник *Levantine*, близо до бреговете на Мейдан и Латакия са 0,8 и 1,4 m съответно, в Тел Авив и Александрия, вълните достигат 0,4 m. Набирайки скорост, вълните се разпространяват в посока южен Кипър, като достигат Лимасол и Ларнака с височини от над 1 m. Освен локалното въздействие на вълните цунами, причинени от източник *Akrotiri*, ясно се забелзва количеството енергия съсредоточено в южна посока, към Александрия и Порт Саид. По своите ефекти върху Александрия, двата източника са съпоставими, с максимални височини от 0,4 m. Може да се заключи, че *Akrotiri* и *Levantine* имат далеч по-голям цунамигенен потенциал, както и най-голямо въздействие върху бреговете на Египет (Александрия и областта около нея), докато *Paphos* има въздействие близо до Анталия (Турция) и Порт Саид, въпреки отседния си характер. Източник *Latakia* е способен да генерира цунами с височини около 0,5 m близо до Тартус (Сирия).

В близост до по-големите градове (Пафос, Тартус, Бейрут и Тел Авив) от всеки регион са избрани точки, в които да се изчислят синтетични мареограми (Фиг. 3.23.). Най-голям риск от цунами за гр. Пафос, се очаква да възникне от източник *Akrotiri* ($M=7,2$), тъй като механизмът на земетресението е възседен и по този начин вертикалната компонента на отместването е доминираща. Източник *Latakia* генерира сравнително високи амплитуди за Тартус. Третата графика показва висок скок от около 6,0 m, близо до Бейрут, който е породен от източник *Levantine* ($M=7,5$). След първоначалната положителна вълна от 2,0 m, следва отрицателна такава с амплитуда от -4,0 m, което подсказва за отдръпване на морето. Източници *Akrotiri* и *Paphos* имат слабо влияние върху Тел Авив, амплитудите варират около 0,2 m, докато максималните стойности идват от източник *Levantine*.

От направените симулации в най-източната част на Средиземно море, може да се обобщи, че източници *Akrotiri* и *Levantine* остават с по-висок цунамигенен



Фиг. 3.22. Поле на максималните височини за четирите сеизмични източника.



Фиг. 3.23. Синтетични мареограми: 1-Пафос (Кипър), 12-Тартус (Сирия), 15-Бейрут (Ливан) и 19-Тел Авив (Израел).

потенциал за южното крайбрежие на Кипър и близко-източните държави. Градове като Ларнака, Лимасол, Тартус, Бейрут, Библос, Хайфа, Акре, Тел Авив, Триполи (Ливан) и Александрия са уязвими от наводнения, причинени от цунами вследствие на изследваните моделирани източници. Не трябва да се подценява опасността от евентуални земетресения от източния сегмент на Елинската дъга. Както се спомена по-горе, достатъчно силни земетресения с магнитуд $M \sim 8,0$ са способни да генерират цунами, които се разпространяват на много големи разстояния, като набират скорост и достигат бреговете с огромна мощ, нанасяйки щети, както върху пристанищни структури и материални фондове, така и върху населението.

4. Карти на опасността от цунами. Анализ на резултатите

Сценариите на опасност от цунами, описващи феномена от източника на генериране, през разпространението си в морските басейни, до въздействието върху крайбрежието, засегнато от вълните, показват нивото на опасност в разглежданата област за конкретно събитие. Сценариите на опасността от цунами могат да бъдат очертани чрез следната методология:

- ❖ избор на източници;
- ❖ числени модели;
- ❖ данни за батиметрия и топография (комбиниране на данни суша-море);
- ❖ различна разделителна способност на избраните мрежи;
- ❖ регионални сценарии на опасността от цунами;
- ❖ локални сценарии на опасността от цунами;
- ❖ обобщени сценарии (комбинация от индивидуални източници).

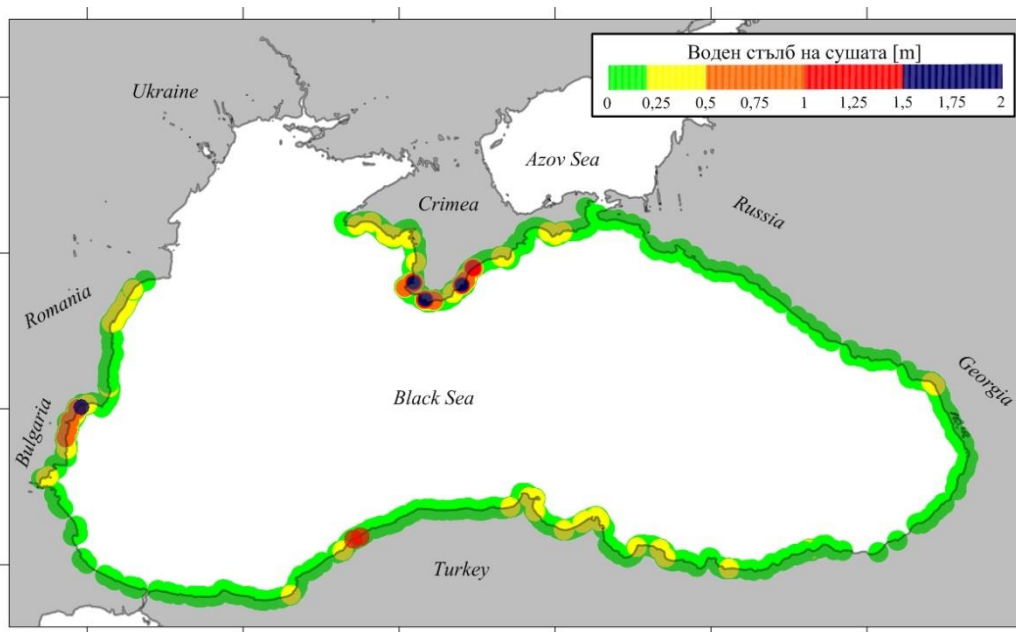
Картите на сценариите трябва да представят изложените на опасност елементи от засегнатите от вълните зони и последиците от тях – наводнение или отдръпване на морето. За картите на щетите (Tsunami Damage Maps), причинени от цунами се включва съответно и нивото на щетите, изчислено качествено или количествено.

4.1. Черно море

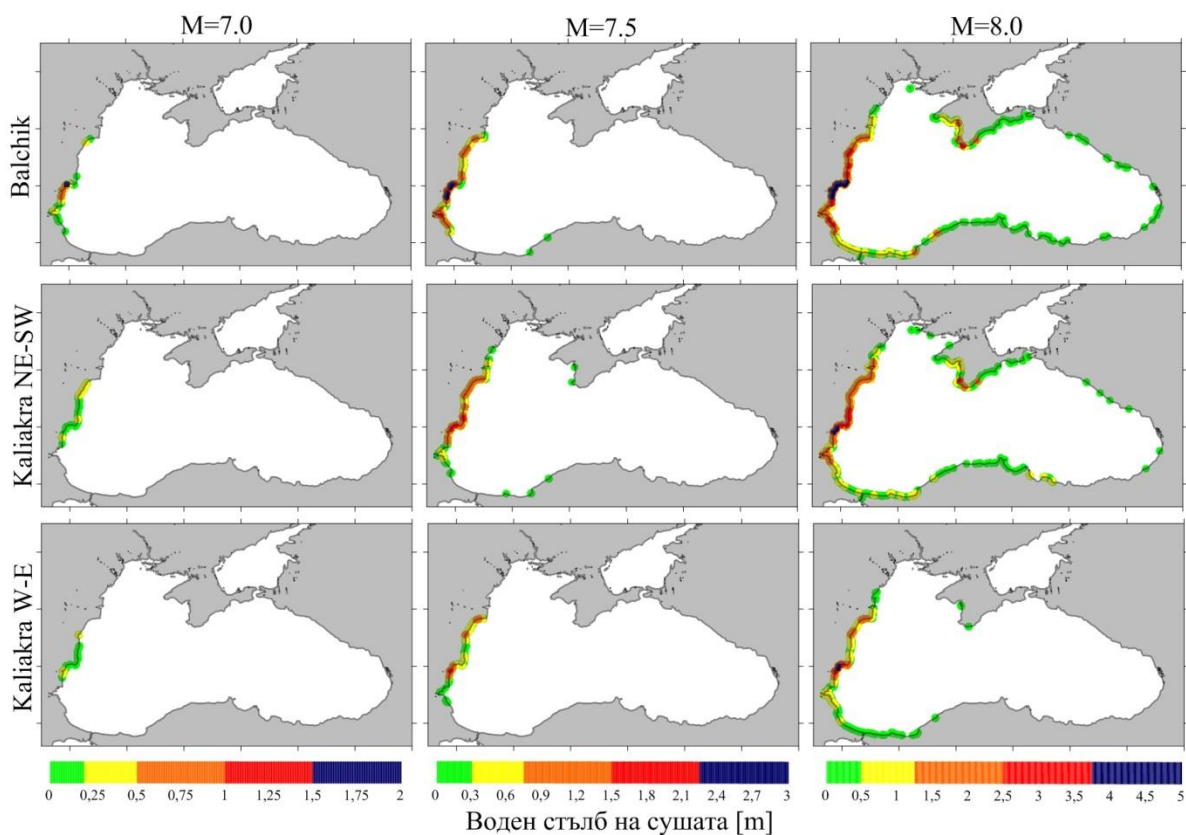
За представянето на регионална карта на опасността от цунами за цялото Черно море, се използват резултати от моделираните събития в областта на Черно море (без Зони 3, 8 и 9). Опростена карта на зоните, които са изложени на наводнения, причинени от цунами, е представена на Фиг. 4.1. Включва седем цунамигенни източника, а избраните магнитуди за Зона 1 са $M=7,0$. Северното крайбрежие на България, Кримски полуостров са измежду потенциално уязвимите зони, като височината на водния стълб на сушата достига 2 m. Северозападното крайбрежие на Турция, включващо областта между Зонгулдак и Амасра, също подлежи на локални наводнения (1 m) от сеизмичния източник в Зона 2. Изчисленият воден стълб на сушата за по-голямата част от бреговата зона на Черно море е 0,25 m, с някои изключения, където достига 0,5 m.

Детайлно е изследвано въздействието на вълни цунами върху североизточното крайбрежие на България, като са моделирани три възможни разломни конфигурации в сеизмична зона Шабла-Калиакра, всяка от които с магнитуди $M=7,0$; $7,5$; $8,0$. На Фиг. 4.2. са представени потенциално застрашените зони, като този път са включени само трите източника, без влияние на останалите зони, обсъдени по-рано. Най-висока опасност от цунами предизвиква източник *Balchik*, като изчислените височини на водния стълб за северната част на Българското крайбрежие достигат повече от 1,5 m, дори за $M=7,0$, при $M=7,5$ - те вече са над 2,3 m, а при екстремния $M=8,0$ - височините надвишават 4 m. Заливът на Бургас е частично защитен от разположения по на север н.

Емине. Трябва да се отбележи, че и при деветте сценария Румънското крайбрежие е сериозно засегнато, като височините надвишават 2,5 m при $M=8,0$. Резултатите за източник *Kaliakra W-E* показват най-ниски стойности на височините на водния стълб на сушата.



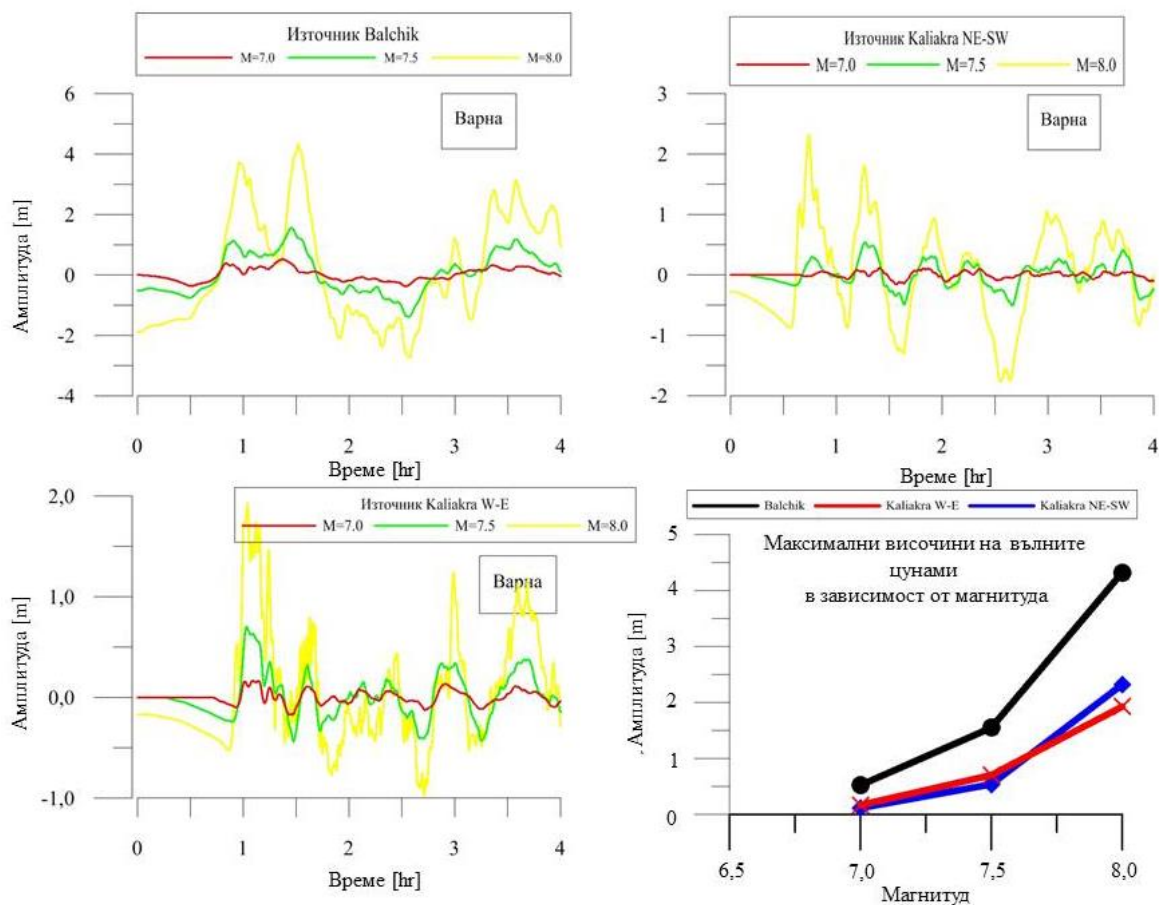
Фиг. 4.1. Опростена карта на опасността от цунами, генерирани от сеизмични източници в Черно море.



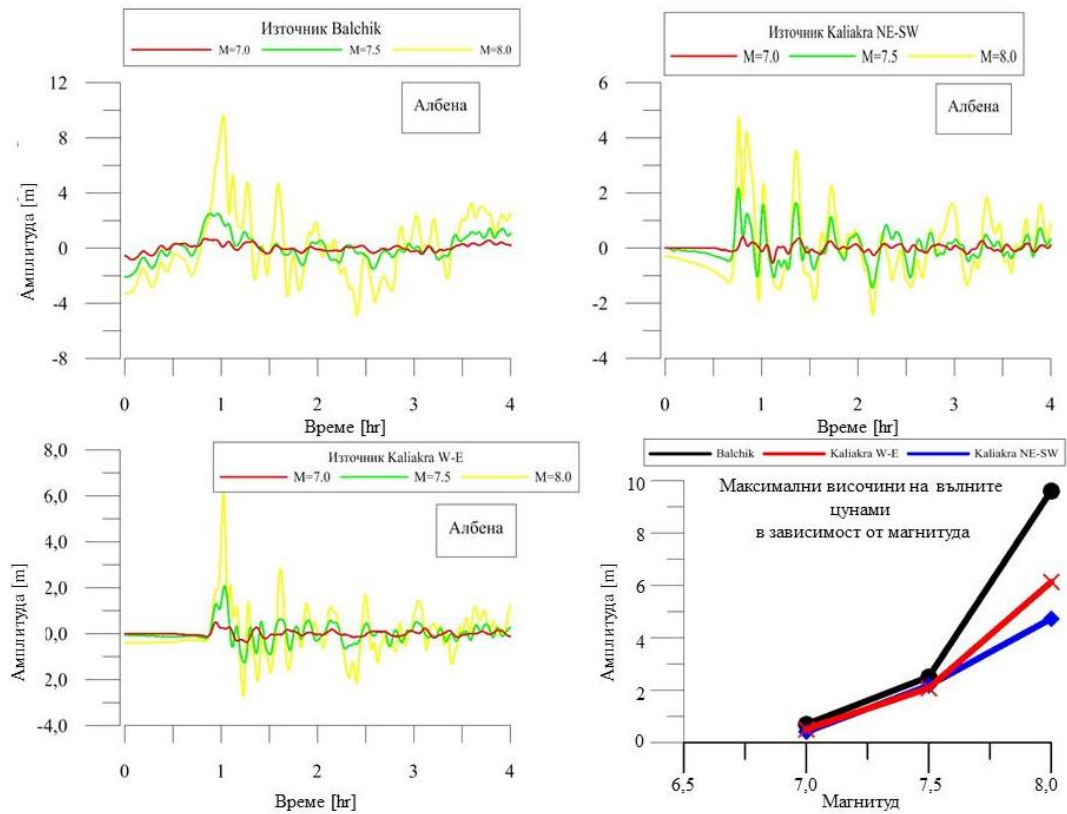
Фиг. 4.2 Потенциално застрашени зони от цунами, при магнитуди $M=7,0$; $7,5$; и $8,0$ на цунамигенните източници от сеизмична зона Шабла-Калиакра.

Детайлно е разгледано крайбрежието между залива на Варна и н. Калиакра. Резултатите са изчислени върху най-фината батиметрична и топографска мрежа с разделителна способност 50 m. Избраните магнитуди в тези сценарии са $M=7,5$. Източник *Balchik* влияе почти на цялата разглеждана област, с оценени стойности на водния стълб от над 0,8 m. Източник *Kaliakra NE-SW* създава височини от 0,4 до 1,5 m, за ивицата между курортите „Св. Св. Константин и Елена“ и „Златни пясъци“, докато потенциалните височини за *Kaliakra W-E* в същата зона надвишават 1,8 m. Около град Балчик и на изток до н. Калиакра, стойностите се запазват около 1,0 m (за източник *Kaliakra NE-SW*), докато за *Kaliakra W-E*, те са по-ниски от 1,0 m.

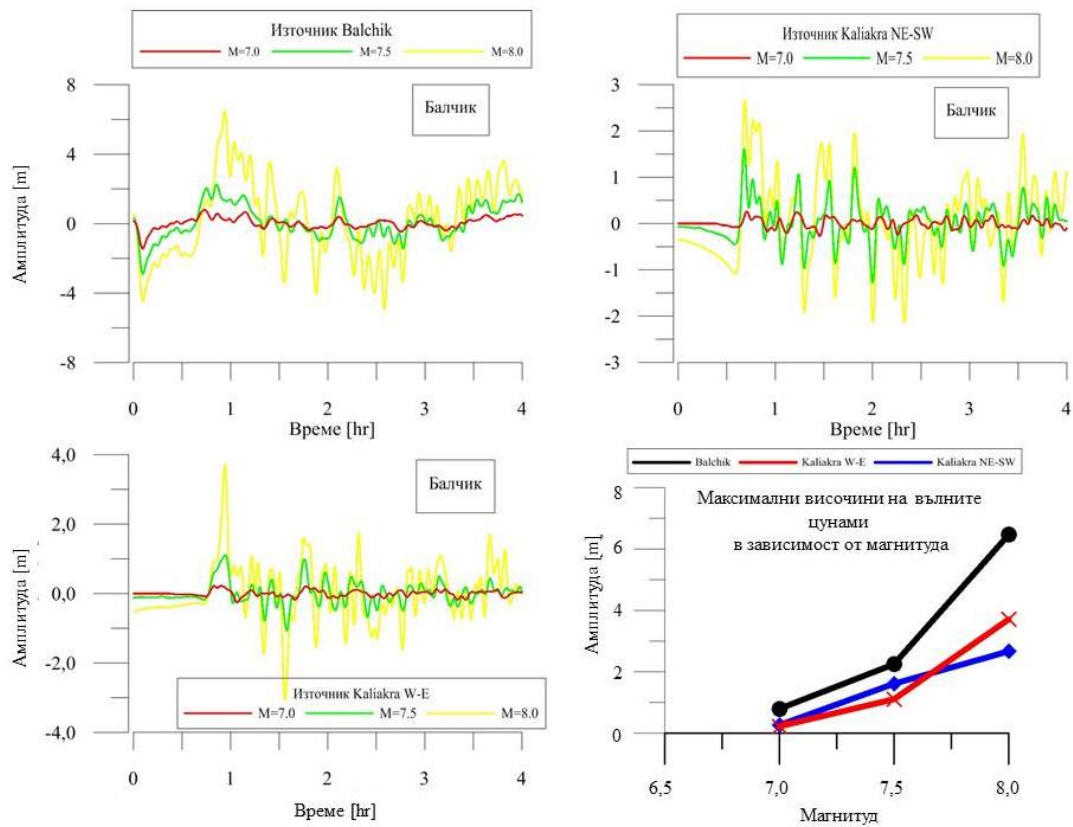
Графичните изображения (Фиг. 4.3., Фиг. 4.4. и Фиг. 4.5.) дават информация за еволюцията на вълните цунами в трите избрани точки, спрямо трите източника и спрямо трите магнитуда. Показани са и максималните височини на вълните цунами в зависимост от избрания магнитуд. Забелязва се, че при Варна основните пикове на вълните започват между 30 минути и 1 час след земетресението. При $M=8,0$, колебанията на морското ниво са значителни дори 4 часа след стартиране на симулациите. За Албена, максималните моделирани височини от източник *Balchik* са екстремно високи, достигайки 10 m при $M=8,0$. Максималните стойности на височините на вълните цунами, изчислени за трите източника с магнитуд $M=7,0$ са почти еднакви, както и изчислените за магнитуд $M=7,5$ стойности са подобни и за трите източника (Фиг. 4.4.-долу дясно). За град Балчик, максималните височини надвишават 6 m. В заключение, източници *Kaliakra NE-SW* и *Kaliakra W-E* имат приблизително еднакво поведение при симулациите на трите магнитуда. Доминиращият източник, способен да предизвика цунами с екстремно високи вълни е *Balchik*.



Фиг. 4.3. Синтетични мареограми за Варна (при $M=7,0$; $7,5$; $8,0$). Максимални височини на вълните цунами в зависимост от избрания магнитуд.



Фиг. 4.4. Синтетични мареограми за Албена (при M=7,0; 7,5; 8,0). Максимални височини на вълните цунами в зависимост от избрания магнитуд.



Фиг. 4.5. Синтетични мареограми за Балчик (при M=7,0; 7,5; 8,0). Максимални височини на вълните цунами в зависимост от избрания магнитуд.

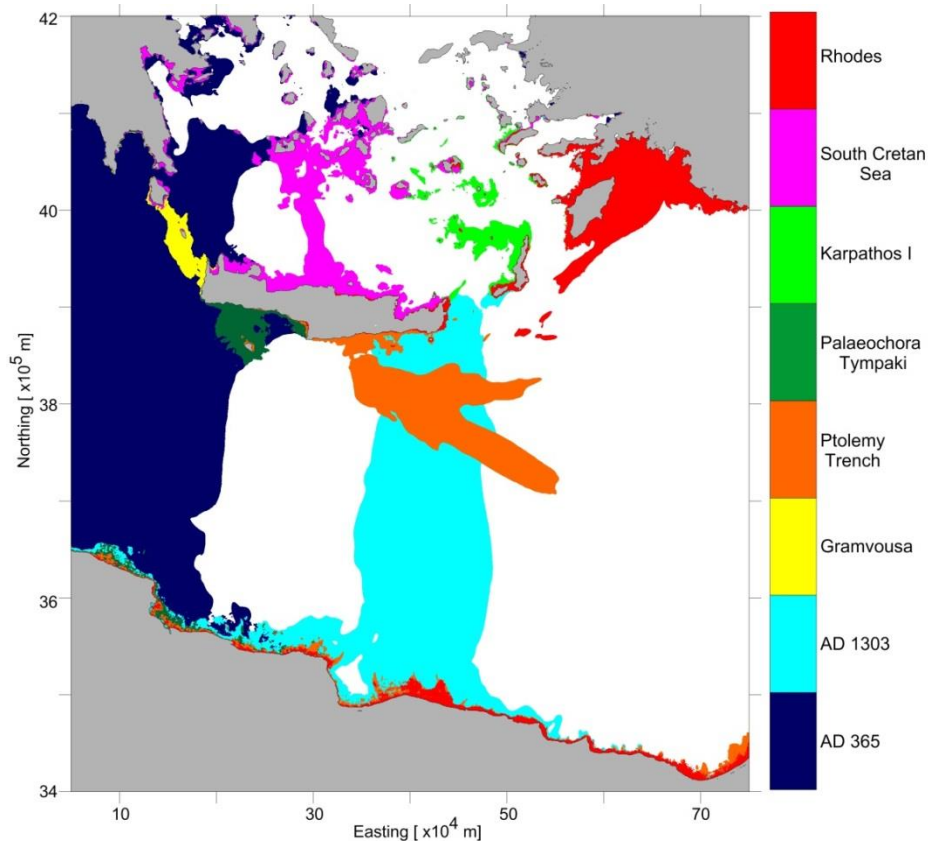
Предложената карта на Фиг. 4.1. дава информация за максималните очаквани височини на водния стълб на сушата, изчислен за седемте източника. Североизточната част на България е сериозно засегната от трите източника, разположени в Зона 1, с доминиращо влияние от източник *Balchik. Kaliakra NE-SW* е доминиращ източник за очаквано наводнените бреговете на Румъния и по-точно, на север от Констанца. Източник *Crimea*, разположен в Зона 7, генерира цунами, което се разпространява в почти цялото Черноморие с височини от 0,25 m, докато в Ялта, Севастопол и Феодосия, вълните надвишават 1 m. Източник *Turkey* създава локални наводнения в областта около Амасра (1 m) и малки отклонения от морското ниво по ивицата между Истанбул и Зонгулдак (до 0,25 m). Източник *Georgia* въздейства върху залива при Сухуми (Грузия), достигайки 0,5 m над морската повърхност. Източник *Caucasus* действа локално на бреговете между Новоросийск и Геленджик. Най-плитководната част на Черно море, включваща залива при Одеса, остава незасегната от изследваните цунамигенни зони.

4.2. Егейско море

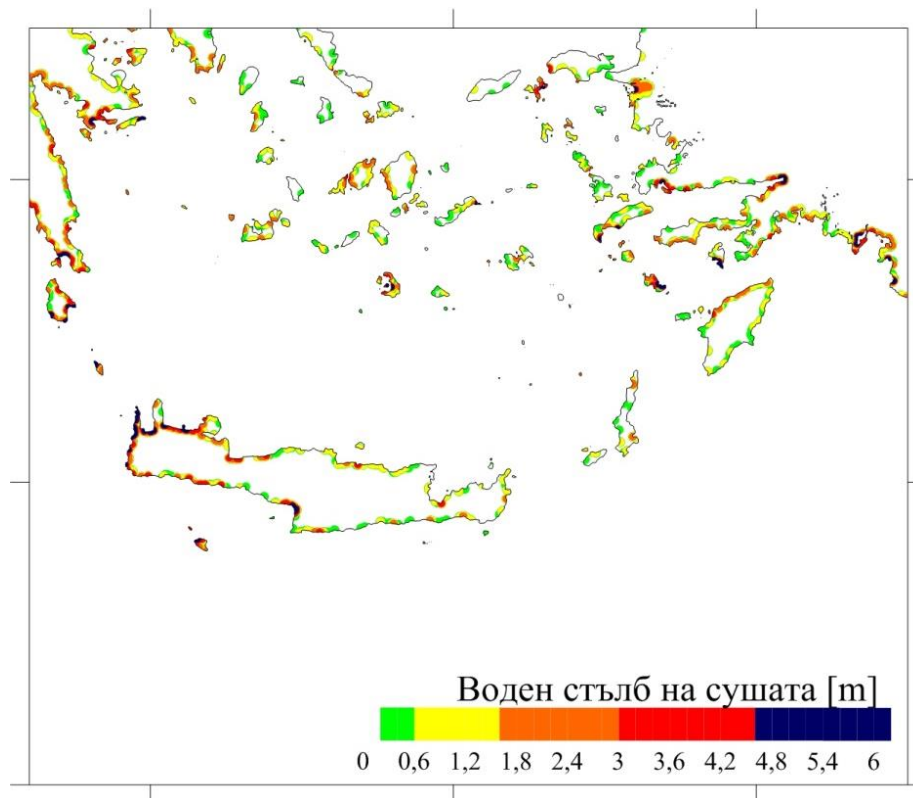
За моделираните сеизмични източници в южната част на Егейско море, е построена карта, която показва приноса на всички сценарии, според техните изчислени максимални височини на вълните цунами (Фиг. 4.6.). Цветните зони показват максималните положителни височини, изчислени за всеки източник, както и географското разпределение на засегнатите зони и въздействието от изучените сеизмични източници. Ясно се открояват реконструиранията събития от 365 г. и 1303 г., които имат най-високо влияние за потенциално застрашените области. Източник *Rhodes* не бива да се пренебрегва, т.к. позицията му е разположена близо до бреговите райони, и съответно времето за евакуация на градове като Фетие, е по-малко от 10 min. Източник *South Cretan Sea* е сценарият, който допринася най-много за опасността от цунами по островите, разположени на север от Крит. Източник *Gramvousa* има силно влияние върху западното крайбрежие на Крит и южната част на о. Китира. Бреговете на Либия и Египет са застрашени от потенциални земетресения, генериращи цунами в зоните на Елинската Дъга. Ефектите от източници *Ptolemy Trench* и *Palaeochora-Tympaki* са по-скоро локални. Моделираното събитие *Karpathos I* допринася за максимални височини по северозападното крайбрежие на о. Карпатос и част от островите, разположени на северозапад от него. Източната част на о. Карпатос е най-засегната от източник *Rhodes*.

Потенциално застрашените зони от цунами в южната част на Егейско море, са представени на Фиг. 4.7. Оценени са всички потенциални цунамигенни източници, като максималните наводнения се очакват от източници *WHA* и *EHA*. Максималните височини на водния стълб на сушата варират от 4 до 6 m и по своето географско положение се наблюдават в много от изследваните райони, като: западната част на Крит, Китира, южната част на Пелопонес, Санторини, южната част на о. Кос, заливът при Бодрум, ивицата между Фетие и Мармарис и др. Повечето крайбрежни райони са засегнати от височини на водния стълб от 0,5 m.

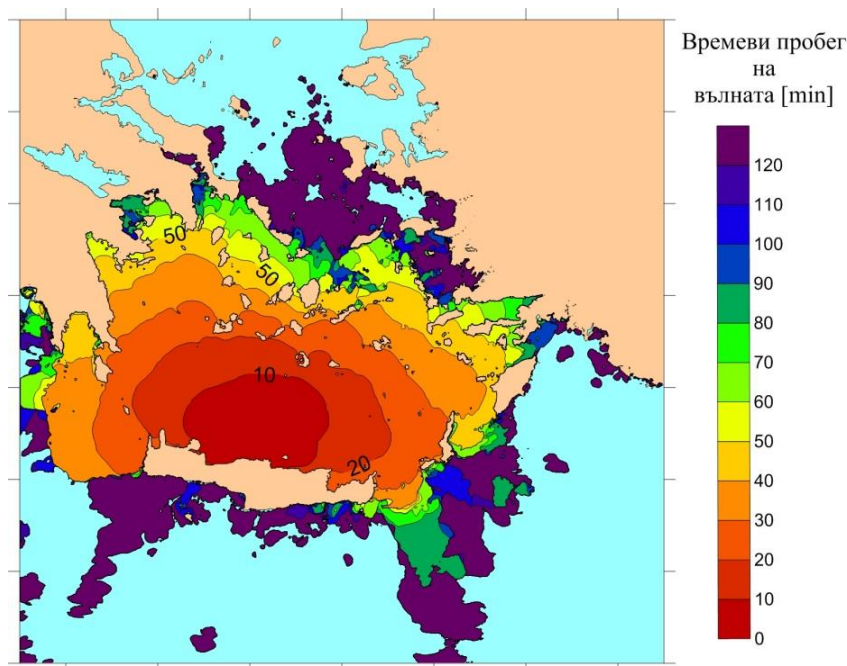
Пример за карта на времената на пристигане на вълни цунами, е представена на Фиг. 4.8. Разгледаният източник е *South Cretan Sea*, а фигурата показва първите 2 часа от симулацията. Времето за евакуация в северната част на о. Крит е по-малко от 10 min. Санторини е застигнат от вълните цунами между 10 и 20 min след земетресението. За половин час, вълните приближават западното крайбрежие на о. Карпатос и о. Китира. Множеството острови в Егейско море играят роля на преграда за вълните цунами и те не достигат най-северните части на морето.



Фиг. 4.6. Принос на всички моделирани сценарии в южната част от Егейско море според максималните изчислени височини на вълните цунами.



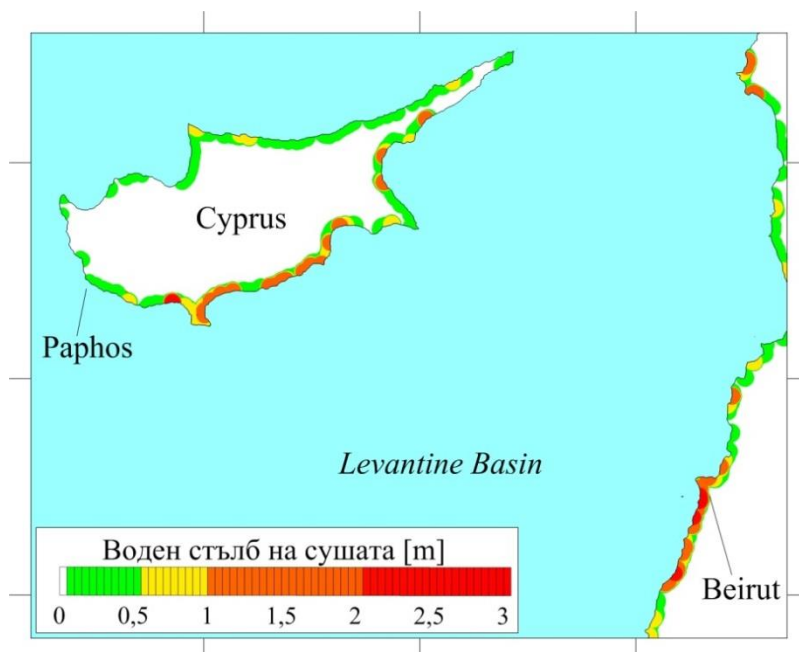
Фиг. 4.7. Потенциално застрашени зони от цунами от моделираните сеизмични източници за южно Егейско море.



Фиг. 4.8. Времени пробег на вълните цунами, генерирани от източник *South Cretan Sea*.

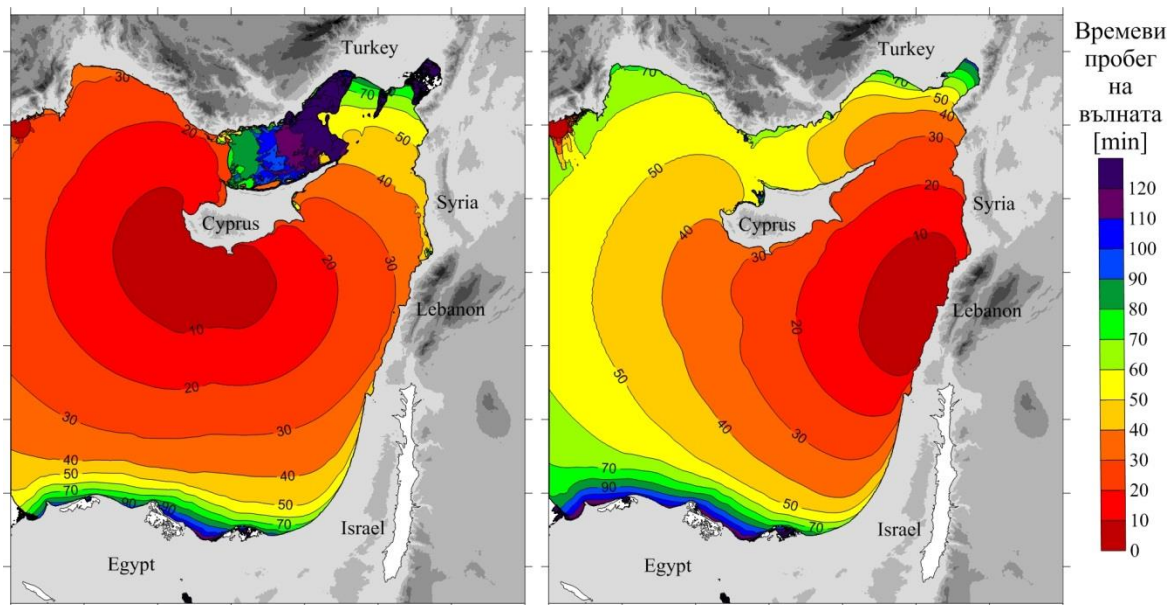
4.3. Източно Средиземноморие

В най-източната част на Средиземно море са избрани четири сценария на цунамигенни източници. Резултатите показват силно влияние по бреговите зони за два от тези източници, а именно *Akrotiri* и *Levantine*. Потенциално застрашените зони са представени схематично на Фиг. 4.9, като се имат предвид само събитията с магнитуд $M=7,2$ и $M=7,5$, съответно за *Akrotiri* и *Levantine*. Максималните изчислени стойности на водния стълб на сушата за о. Кипър и Ливанските брегове варират от 0 до 3 m, като очакваните максимални височини са при Бейрут.



Фиг. 4.9. Потенциално застрашени зони от цунами за о. Кипър и крайбрежието на близкоизточните държави.

Времената на пристигане на вълните цунами, за първите 2 часа след земетресенията, до различни точки от Източното Средиземноморие са оценени и илюстрирани на Фиг. 4.10. Изохроните, представени за източник *Levantine* показват, че за по-малко от 10 min първите вълни пристигат до Бейрут, а за 30 min до югоизточните брегове на Кипър. Времето за евакуация на населението по югозападното крайбрежие на Кипър е около 10 min, допринесено от източник *Akrotiri*. Бреговете на Египет са достигнати от цунами за повече от 1 час и за двата източника.



Фиг. 4.10. Времена на пристигане на вълните цунами за източници *Akrotiri* и *Levantine*.

Приложимост на резултатите

Високият брой жертви, причинени вследствие на земетресението и последвало цунами през 2004 г. (Суматра), както и огромните щети, нанесени след вълните от 2011 г. (Япония), доведоха до належаща нужда от ефективни методи за оценка на въздействието на цунами върху крайбрежните структури, както чрез числени симулации, така и чрез лабораторни експерименти. Представените сценарии на вълни цунами могат да се използват за определяне на важни фактори при установяването на характеристиките и елементите на вълните. Вълните цунами са сред най опасните и разрушителни феномени през изминалите десетилетия.

Изследването на опасността (хазарт + риск) от цунами, чрез численото моделиране, спомага за построяването на оптимална мрежа от станции, измерващи морското ниво, с цел ранно предупреждение от цунами в Източното Средиземноморие. Оценката на времената на пристигане на цунами до определен район или град, подпомага ефективното изпращане на информация до центрoвете за предупреждение от цунами, съответно повишава времето за евакуация на населението от потенциално засегнатия район.

Целта на Международните системи за предупреждение от цунами е да регистрират, локализируют и определят магнитуда на потенциално цунамигенно земетресение, което би се случило навсякъде по света. Центровете за изследване на цунами, които предоставят информация в Средиземно море, към момента са страните Португалия, Франция, Италия, Гърция и Турция. Системите за ранно предупреждение

работят непрекъснато, като при някои от тях, минималният праг на магнитуда е $M_s > 6,5$. Бързото определяне на механизма на земетресението зависи и от броя станции, регистрирали земетресението, което от своя страна влияе значително на оценката за това, дали едно земетресение е цунамигенно или не. Оттук следва т.нар. “Matrix Decision” или какво да бъде съобщението, изпратено до централите за мониторинг на цунами.

Използваният метод в настоящата дисертация, UBO-TSUFDF, е валидиран и включен в работата на проекта “*North Eastern Atlantic, Mediterranean and connected seas Tsunami Warning System*”, за мониторинг на вълните цунами по Италианските брегове, като този проект е под ръководството на “*The Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO (IOC-UNESCO)*”.

Получените резултати в дисертационната работа са важен принос в оценката на опасността от цунами в Източното Средиземноморие, включително и Черно море. Те могат да се използват при проектирането и изграждането на предпазни съоръжения по крайбрежните зони, както и при проектирането и изграждането на индустриални обекти, като сондиращи платформи, газопроводи, нефтопроводи и др., за които при проектирането се налагат стриктни изисквания за безопасност при природни бедствия и/или катастрофални аварии.

III. Научна дейност на докторанта

Публикации във връзка с дисертацията:

1. **L. Dimova** and R. Raykova, 2018b, *Tsunami hazard of the Black Sea coast by numerical modelling*. Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences, Vol. 71, 10, pp. 1350-1356.

2. **L. Dimova**, R. Raykova, A. Armigliato, G. Pagnoni and S. Tinti, 2018, *Modelling of earthquake-induced tsunami in the Eastern Mediterranean region*. AIP Conference Proceedings 2075, 120024 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5091282>.

3. **L. Dimova** and R. Raykova, 2016, *Observations and modeling of tsunamis in the Eastern Mediterranean (REVIEW)*. Annual of Sofia University „St. Kliment Ohridski“, Faculty of Physics, Vol. 109, pp. 24-41.

4. **L. Dimova**, R. Raykova, A. Armigliato, G. Pagnoni and S. Tinti, 2017, *Detailed tsunami modeling in the region of NE coast of Bulgaria*. Annual of Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Faculty of Physics, Vol. 110, pp. 81-91.

5. **L. Dimova**, 2018, *Tsunami radiation pattern in the southern Aegean Sea*, Annual of Sofia University „St. Kliment Ohridski“, Faculty of Physics, Vol. 111, pp. 23-40.

6. **L. Dimova** and R. Raykova, 2018a, *Numerical simulations of the earthquake-induced tsunami of July 20, 2017 ($M_w=6.6$) in Bodrum-Kos, Aegean Sea*, Review of Bulgarian Geological Society. Vol. 79, part 1, pp. 5-12.

7. **L. Dimova**, A. Armigliato, G. Pagnoni, S. Tinti and R. Raykova, 2016, *Tsunami radiation pattern from seismic sources in the Black Sea*. In: Proceedings of the 3rd Bulgarian National Congress on Physical Sciences, Sofia, Bulgaria, Sep. 29 – Oct. 02, 2016, S06.57:1-13 [DVD: ISBN 978-954-580-364-2] Heron Press: Sofia.

8. **L. Dimova** and R. Raykova, 2017, *Tsunami radiation pattern in the Eastern Mediterranean*. Journal of Physics and Technology, Vol. 1, Number 2, pp. 22-27.

Кратко научно съобщение:

1. **L. Dimova**, R. Raykova, *Scenario based on numerical simulations of 20 July 2017 Bodrum-Kos tsunami*, In Short Communications from National Conference with international participation “GEOSCIENCES 2017”, 2017, pp. 109-110.

Разширен абстракт от конференция:

1. **Л. Димова** и Р. Райкова, 2016, *Моделиране на цунами, генерирани от земетресения в Черно море*. В Сборник на VIII Национална Конференция по Геофизика, 25 Ноември 2016, София, България, стр. 14-17.

Участие в Международни конференции:

1. **L. Dimova**, A. Armigliato, G. Pagnoni, S. Tinti and R. Raykova, *Earthquake-induced Tsunamis in the northwestern Black Sea*, In Book of Abstracts: 35th General Assembly of the European Seismological Commission, 4-10 September 2016, Trieste, Italy (abstract 2016-546, p.31) – poster.

2. **L. Dimova**, A. Armigliato, G. Pagnoni, F. Zaniboni, S. Tinti and R. Raykova, *Tsunami Waves Generated by Earthquakes: Computed by Means of Numerical Simulations in the Western Black Sea*. In Book of Abstracts: CTBT: Science and Technology 2017 Conference, 26 – 30 June, 2017, Vienna, Austria (abstract T1.4-P8, p.30) – poster.

3. **L. Dimova**, A. Armigliato, G. Pagnoni, S. Tinti and R. Raykova, *Tsunami Hazard Maps Based on Numerical Simulations in the Black Sea Region*, In Book of Abstracts: 36th General Assembly of the European Seismological Commission, 2-7 September 2018, Valletta, Malta (abstract 2018-S35-575, p.559) – poster.

4. **L. Dimova**, R. Raykova, A. Armigliato, G. Pagnoni and S. Tinti, *Modelling of earthquake-induced tsunami in the Eastern Mediterranean region*. 10th Jubilee International Conference of the Balkan Physical Union, 26-30 August 2018, Sofia, Bulgaria. – poster.

Участие в Национални конференции:

1. **L. Dimova** and R. Raykova, *Scenario based on numerical simulations of 20 July 2017 Bodrum-Kos Tsunami*, GEOSCIENCES, 7-8 December 2017, Sofia, Bulgaria. (National Conference with international participation) – poster.

2. **L. Dimova**, A. Armigliato, G. Pagnoni, S. Tinti and R. Raykova, 2016, *Tsunami radiation pattern from seismic sources in the Black Sea*. 3rd Bulgarian National Congress on Physical Sciences, Sofia, Bulgaria, Sep. 29 – Oct. 02, 2016, poster.

3. **Л. Димова** и Р. Райкова, 2016, *Моделиране на цунами, генерирани от земетресения в Черно море*. VIII Национална Конференция по Геофизика, 25 Ноември 2016, София, България. – устно представяне.

4. **L. Dimova** and R. Raykova, 2017, *Tsunami radiation pattern in the Eastern Mediterranean*. VI Национална Студентска Научна Конференция по Физика и Инженерни Технологии, 16-18 ноември 2017 г., In book of Abstracts: p.44.– poster.

Участие в научни семинари, обучения и други (по темата на дисертацията):

1. **Л. Димова**, *Генериране и разпространение на цунами*, Научен семинар в УНБ "Проф. Цв. Бончев", 25-26 април 2015 г., Гьолечица, – устно представяне.
2. **Л. Димова**, *Моделиране на вълни цунами*, „Докторантски Чай“, 17 септември 2015 г. – устно представяне.
3. **L. Dimova**, *Generation and propagation of tsunami waves in the Black Sea*, Научен семинар в Университета в Болоня, 5 юли 2016 г. – устно представяне.
4. **Л. Димова**, *Моделиране на цунами, генерирани от земетресения и свлачища в Егейско и Черно море*, Финал на проекта на финансова къща „Карол“, декември 2016 г. – устно представяне.
5. **Л. Димова**, *Числено моделиране на вълни цунами в Източното Средиземноморие*, Научен семинар в УНБ "Проф. Цв. Бончев", 8-10 юни 2018 г., Гьолечица – устно представяне.
6. **Л. Димова**, *Моделиране на вълни цунами, генерирани от земетресения*, Докторантски семинар по проект „ДокЦент“, 12-14 октомври 2018 г., Боровец – устно представяне.

Международно сътрудничество:

1. Еразъм+ с цел практика, за академичната 2015/2016 г. в Университета в Болоня, Италия (6 месеца).
2. Еразъм+ с цел обучение, за академичната 2016/2017 г. в Университета в Болоня, Италия (6 месеца).
3. Двуседмично посещение на Лабораторията по Геофизика в Университета в Болоня, Италия, по проект за подпомагане на докторанти на проф. Витанов в периода 6-18 юли 2015 г.
4. Едноседмично посещение на Факултет по Математика и Науки за Земята, Университет в Триест, Италия по покана на проф. Фабио Романели в периода 04.10.2017 г – 11.10.2017 г.

Награди:

- **Докторант на 2016 г.** – Национален приз на Националното Представителство на Студентските Съвети в Р. България.
- Годишни награди на Софийски университет „Св. Кл. Охридски“ – Грамота за постижения в научноизследователската и образователна дейност – 25 ноември 2017 г.
- Награда за най- добър постер на конференция „Геонауки 2017“ – 8 декември 2017 г.

Забелязан цитат на статия: L. Dimova and R. Raykova, 2018a, *Numerical simulations of the earthquake-induced tsunami of July 20, 2017 (Mw=6.6) in Bodrum-Kos, Aegean Sea*, Review of Bulgarian Geological Society. Vol. 79, part 1, pp. 5-12.

- Dogan et al., 2019. The 20th July 2017 Bodrum–Kos Tsunami Field Survey. Pure Appl. Geophys., doi 10.1007/s00024-019-02151-1.

Участия в проекти по ФНИ към СУ:

1. Изследователски проект в подкрепа на докторанти „Построяване на карти на опасността от цунами за района на Черно море“ – договор 80-10-215/2018 г.
2. Факултетски изследователски проект „Томография по данни от Виртуалната Сеизмична Мрежа на Софийски университет“ – договор 80-10-214/2018 г.

3. Факултетски изследователски проект „Крос-корелация на сеизмичен шум по данни от ВСМСУ“ - договор 80-10-200/2017 г.

4. Изследователски проект в подкрепа на докторанти „Числено моделиране на вълни цунами в Източното Средиземноморие“ – договор 80-10-21/2017 г.

5. Факултетски изследователски проект „Изследване на регионалната сеизмичност на Балканския полуостров регистрирана на Виртуалната Сеизмологична Мрежа на Софийски Университет“ – договор 199/2016 г.

6. Изследователски проект в подкрепа на докторанти „Моделиране на аномални вълни в Черноморието“ – договор 215/2016 г.

7. Факултетски изследователски проект „Виртуална Сеизмологична Мрежа на Софийски Университет“ – договор 155/2015 г.

8. Участие в докторантски проект на проф. Н. Витанов с договор BG051PO001-3.3.06-0057 на тема: „Изграждане на съвременна образователна и научноизследователска среда за развитието на докторанти, постдокторанти и млади учени във Физическия факултет на СУ „Св. Климент Охридски.“

IV. Литература

- [1] Dimova L., R. Raykova, 2016, Observations and modeling of tsunamis in the Eastern Mediterranean (REVIEW). *Annual of Sofia University „St. Kliment Ohridski“, Faculty of Physics*, 109, pp. 24-41.
- [2] Rangelov, B., E. Mircheva, I. Lazarenko, R. Encheva, 2008a, The archaeological site – possible evidence about multihazard ancient events, In *Geoarchaeology and Archaeomineralogy: Proceed. of the Int. Conference, 29-30 October 2008, Sofia*, pp. 347-352.
- [3] Papadopoulos, G. A., G. Diakogianni, A. Fokaefs and B. Rangelov, 2011, Tsunami hazard in the Black Sea and the Azov Sea: a new tsunami catalogue, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, pp. 945-963.
- [4] Rangelov, B., 2011, Natural Hazards – nonlinearities and assessment, *Acad. Publ. House (BAS)*, p. 327.
- [5] Altinok, Y. and S. Ersoy, 2000, Tsunamis Observed on and Near the Turkish Coast, *Natural Hazards*, 21, pp. 185-205.
- [6] Yalciner, A., E. Pelinovsky, T. Talipova, A. Kurkin, A. Kozelkov and A. Zaitsev, 2004, Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the historical, instrumental, and numerical data, *Journal of Geophysical Research*, 109, C12023.
- [7] Rangelov, B., 1996, Earthquakes and tsunami hazards in the Black Sea. In Abstract Book of the First Congress of the Balkan Geophysical Society 23-27 September 1996, pp. 44-45.
- [8] Рангелов, Б., Е. Спасов, Н. Доцев, 1987, Спектри на цунами в Черно море, *Българско Геофизично Списание*, XIII, 1, стр. 53-58.
- [9] Dotsenko, S., A. Konovalov, 1996, Tsunami waves in the Black Sea in 1927: observations and numerical modelling, *Phys. Oceanography*, 7, 6, 389-401.
- [10] Papadopoulos, G. A. and A. Fokaefs, 2005, Strong tsunamis in the mediterranean sea: a re-evaluation, *ISET Journal of Earthquake Technology*, 463, 42, 4, pp.159-170.
- [11] Papadopoulos, G. A., E. Gràcia, R. Urgeles, V. Sallares, P. M. De Martini, et al., 2014, Historical and pre-historical tsunamis in the Mediterranean and its connected seas: Geological signatures, generation mechanisms and coastal impacts, *Marine Geology*, 354, pp. 81-109.
- [12] Guidoboni, E. and A. Comastri, 1997, The large earthquake of 8 August 1303 in Crete: seismic scenario and tsunami in the Mediterranean area, *Journal of Seismology*, 1, pp. 55-72.
- [13] Guidoboni, E., A. Comastri and G. Traina, 1994, Catalogue of Ancient Earthquakes in the Mediterranean Area up to the 10th Century, SGA, 1.
- [14] Fokaefs, A. and G. A. Papadopoulos, 2007, Tsunami hazard in the Eastern Mediterranean: strong earthquakes and tsunamis in Cyprus and the Levantine Sea, *Natural Hazards*, 40, pp. 503-526.
- [15] Tari, E., M. Sahin, A. Barka, R. Reilinger, R. W. King, S. McClusky, M. Prilepin, 2000, Active tectonics of the Black Sea with GPS, *Earth Planets Space*, 52, pp. 747-751.

- [16] Hall, J., T. Calon, A. Aksu, S. Meade, 2005, Structural evolution of the Latakia Ridge and Cyprus Basin at the front of the Cyprus Arc, Eastern Mediterranean Sea, *Marine Geology*, 221, pp. 261-297.
- [17] Ward, S., 2010, Tsunami, *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, Springer Press, p. 18.
- [18] Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *BSSA*, 75, 4, pp. 1135-1154.
- [19] Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *BSSA*, 82, 2, pp. 1018-1040.
- [20] Havskov, J., L. Ottemoller, 2010, Routine Data Processing in Earthquake Seismology With Sample Data, Exercises and Software, *Springer Dordrecht Heidelberg London New York*, p. 350.
- [21] Tinti, S., R. Tonini, 2013, The UBO-TSUFDTsunami inundation model: validation and application to a tsunami case study focused on the city of Catania, Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, pp. 1759-1816.
- [22] Goto, C., Y. Ogawa, N. Shuto, F. Imamura, 1997, Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme, *IUGG/IOC Time Project, IOC Manual, UNESCO*, No. 35, 1997.
- [23] Mai, P., G. Beroza, 2000, Source scaling properties from finite-fault-rupture models, *BSSA*, 90, 3, pp. 604-615.
- [24] Wells, D., K. Coppersmith, 1994, New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, *BSSA*, 84, 4, pp. 974-1002.
- [25] Basili R., V. Kastelic, M. Demircioglu, D. Garcia Moreno, E. Nemser et al., 2013, The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE, <http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/>, doi: 10.6092/INGV.IT-SHARE-EDSF.
- [26] Caputo R., S. Pavlides, 2013, The Greek Database of Seismogenic Sources (GreDaSS), version 2.0.0: A compilation of potential seismogenic sources (Mw > 5.5) in the Aegean Region, <http://gredass.unife.it/>, doi: 10.15160/unife/gredass/0200.
- [27] International Seismological Centre (ISC), 2016, On-line Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>, *Internatl. Seismol. Cent., Thatcher, United Kingdom*.
- [28] Wessel, P., W. Smith, R. Scharroo, J. Luis, F. Wobbe, 2013, Generic Mapping Tools: Improved version released, *EOS Trans. AGU*, 94, 409-410.
- [29] Рангелов, Б., Д. Господинов, 1994, Сеизмична активност след земетресението от 31.03.1901 година в района на Шабла-Калиакра, *Българско Геофизично Списание*, XX, 2, стр. 44-49.
- [30] Pelinovsky, E., 1999, Preliminary Estimates of Tsunami Danger for the Northern Part of the Black Sea, *Physics and Chemistry of the Earth*, 24, 2, pp. 175-178.
- [31] Nikonov, A.A., 1997, Tsunami occurrence on the coasts of the Black Sea and the Sea of Azov, *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 33, pp. 72-87.
- [32] Maramai, A., B. Brizuela, L. Graziani, 2014, The Euro-Mediterranean tsunami catalogue, *Annals of Geophysics*, 57, 4, S0435, doi:10.4401/ag-6437.
- [33] Yalciner, A., A. Annunziato, G. Papadopoulos, G. Dogan, H. Guler et al., 2017, The 20th July 2017 (22:31 UTC) Bodrum/Kos earthquake and tsunami; post tsunami field survey report, p. 116.
- [34] Ganas, A., P. Elias, S. Valkaniotis, P. Briole, V. Kapetanidis, 2017, Co-seismic deformation and preliminary fault model of the July 20, 2017 M6.6 Kos earthquake, Aegean Sea, *Released to EMSC on July 30, 2017 12:20 UTC*, p. 20.
- [35] Galanopoulos, A., 1960, Tsunamis observed on the coasts of Greece from Antiquity to Present Time, *Ann. Geofis.*, 13, p. 369-386.
- [36] Ambraseys, N. and M. Barazangi, 1989, The 1759 Earthquake in the Bekaa Valley: Implications for Earthquake Hazard Assessment in the Eastern Mediterranean Region, *Journal of Geophysical Research*, 94, pp. 4007-4013.
- [37] National Geophysical Data Center / World Data Service (NGDC/WDS): Global Historical Tsunami Database. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5PN93H7 [access date October 2018].
- [38] Dotsenko, S., A. Ingerov, 2007, Characteristics of tsunami waves in the Black Sea according to the data of measurements, *Physical Oceanography*, 17, pp. 17-28.
- [39] Ebeling, C., E. Okal, N. Kalligeris, C. Synolakis, 2012, Modern seismological reassessment and tsunami simulation of historical Hellenic Arc earthquakes, *Tectonophysics*, 530-531, pp. 225-239.



Софийски университет „Св. Климент Охридски“

Физически факултет

Катедра „Метеорология и геофизика“