

ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ – СОФИЯ

Първа научно-приложна конференция с международно участие
„СТОМАНОБЕТОННИ И ЗИДАНИ КОНСТРУКЦИИ – ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА“

22 – 23 октомври 2015

22 – 23 October 2015

First Scientific-Applied Conference with International Participation

“REINFORCED CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES – THEORY AND PRACTICE”

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY – SOFIA

48 ^{ТОМ}
vol.

2015

св.
fasc. 12 – II

НЕЛИНЕЕН АНАЛИЗ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНА СТОМАНОБЕТОННА СТЕНА

А. Илиев¹, Д. Стефанов²

Ключови думи: стоманобетонни стени, нелинейно реагиране, динамичен анализ, числено моделиране

Научна област: сеизмично инженерство

РЕЗЮМЕ

Представени са резултати от международен проект, озаглавен **BENCHMARK CASH**, с тригодишна продължителност. В рамките на проекта се провеждат числени изследвания на експериментално изследвана в European Laboratory for Structural Assessment (ELSA, Joint Research Centre) стоманобетонна стена.

Получени са капацитивни криви от вида „срязваща сила–преместване“ за монотонно нарастващо и циклично хоризонтално натоварване. В резултат на динамичния анализ е получено динамичното реагиране на конструкцията във времето, като последователно са проследени различните стадии – първоначално напукване, развитие на нелинейни деформации до достигане на граничния капацитет. Направени са съответни изводи и коментари за възможностите на използвания софтуер.

1. Въведение

BENCHMARK CASH е международен проект, организиран по инициатива на OEDC-NEA (Nuclear Energy Agency). Главната цел на проекта е да се оцени надеждността на числените методи и наличният софтуер за оценка на сеизмичния капацитет на стоманобетонни стени (шайби) при силни земетресения, като се разглеждат условия на надпроектна ситуация.

¹ Александър Илиев, инж. докторант, НИГГГ-БАН, e-mail: eng.alexander.iliev@gmail.com

² Димитър Стефанов, доц. д-р инж., НИГГГ-БАН, e-mail: dstefanov@geophys.bas.bg

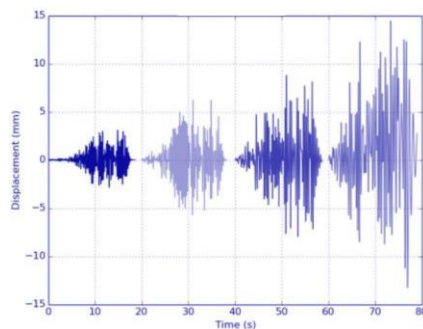
В рамките на проекта се провеждат числени изследвания на експериментално изследвана в European Laboratory for Structural Assessment (ELSA, Joint Research Centre) стоманобетонна стена.

Формата на изследваната конструкция в план е двойно Т. Интерес представлява само реагирането на стъблото. Фланшовете са конструирани с цел избягване на ротация по време на експериментите. Върху горната част на стоманобетонната конструкция е поставена масивна стоманена греда, която служи за предаване на вертикалното натоварване и допълнително стабилизира образеца.

Геометричните размери и подробна схема на натоварването са описани в [1].

В съответствие с план-програмата на проекта са проведени следните анализи:

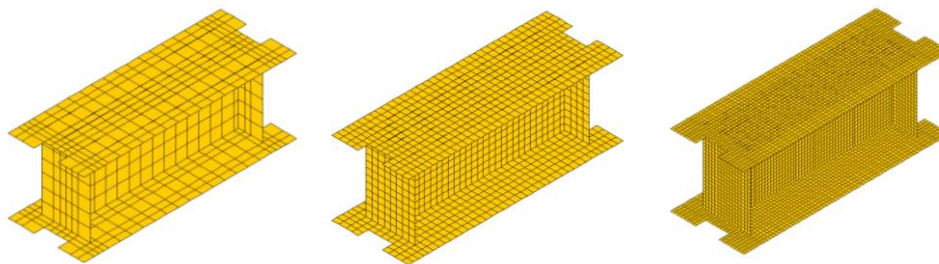
- статичен нелинеен push over анализ;
- цикличен нелинеен push over анализ;
- динамичен нелинеен анализ със специален сигнал (акселерограма), скалиран към различна интензивност (RUN1 до RUN4), с цел достигане на граничния капацитет на изследваната конструкция – фиг. 1.



Фиг. 1. Общ вид на динамичното въздействие

2. Модели с крайни елементи

Разгледани са 3 модела с крайни елементи, означени съответно с M1, M2 и M3, илюстрирани на фиг. 2. Размерите на мрежата на стъблото са съответно 20, 10 и 5 cm.



Модел M1

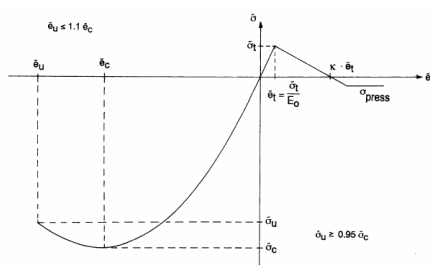
Модел M2

Модел M3

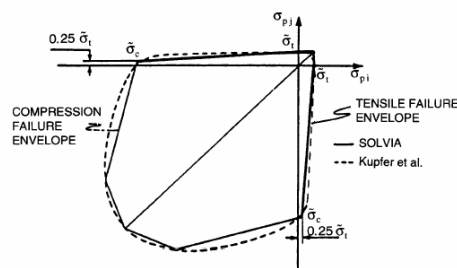
Фиг. 2. Модели с крайни елементи в зависимост от гъстотата на мрежата – M1, M2 и M3

Анализите са проведени със специализирания инженерен софтуер SOLVIA [2].

Използвани са нелинейни модели на материалите, посредством които коравината на елементите се актуализира постоянно в процеса на решение, в зависимост от натрупаните в конструкцията деформации и работните диаграми напрежение–деформация, на използваните материали. На фиг. 3 е показана работната диаграма на бетона.



Фиг. 3. Работна диаграма напрежение-деформация за бетона



Фиг. 4. Капацитетна (гранична) обвивка на бетона. Равнинен изглед

Видът на напрегнатото състояние на елемента влияе съществено на якостно-деформационните показатели на бетона. Критериите за повреди се базират на сравняване на текущото равнинно напрегнато състояние с граничните (допустимите) напрежения в бетона посредством капацитетната обвивка, показана на фиг. 4.

Наличната армировка е моделирана посредством опцията REBAR [2] като равнинни дискове с еквивалентно на армировката напречно сечение. Използван е еласто-пластичен материал.

Затихването е отчетено по метода на Рейли, с коефициенти $\alpha = 2$ и $\beta = 0,002$, което съответства на коефициент на затихване от 8% при честота 10 Hz (първа собствена честота на системата).

Всички анализи са извършени чрез implicit интеграционен метод, чрез метода на Hilber-Huges. За осигуряване на равновесието (конвергенция) във всяка стъпка от решението се извършват итерации с толеранс, базиран на относителната енергия в системата.

3. Резултати от анализите

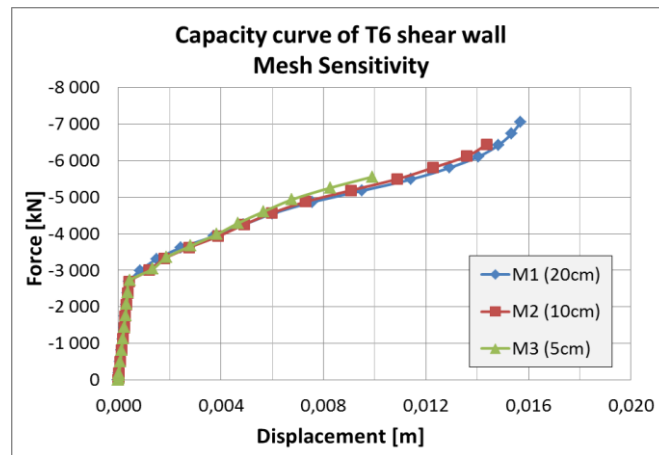
3.1. Резултати от статичен нелинеен push over анализ

Трите изследвани модела с различна големина на крайните елементи са натоварени с монотонно нарастващо хоризонтално натоварване (във вид на преместване) за определяне на капацитивните криви от вида „срязваща сила – преместване“. Получените резултати са илюстрирани на фиг. 5.

По отношение на граничния капацитет на стената, оценката при модел М3 (с най-гъста мрежа) от 5,6 MN логично е най-близка до експериментално установената стойност от 5,3 MN. Модели М1 и М2 дават завишени резултати.

По отношение на максималните премествания, резултатите от модел М3 ($d_{max} = 10$ mm) са близко до експериментално измерените стойности от 14 mm. Резултатите от модели М1 и М2 са по-близки до експерименталните, но видът на кри-

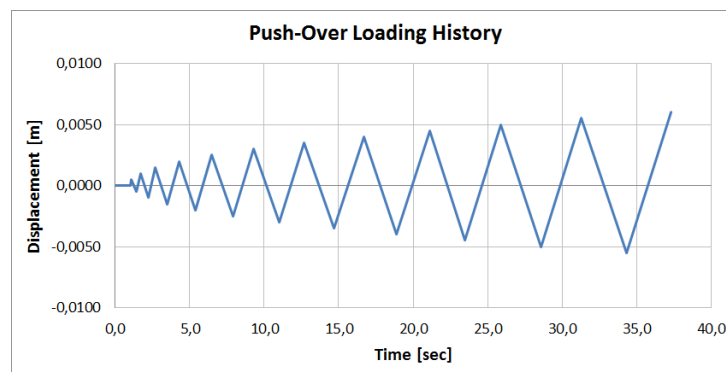
вите с наблюдаваното уякчаване, в последните етапи на численото решение е нереален, което вероятно се дължи на натрупаните нееластични деформации и може да се окачестви като „числен ефект“.



Фиг. 5. Капацитивни криви срязваща сила–преместване за трите модела

3.2. Резултати от цикличен нелинеен push over анализ

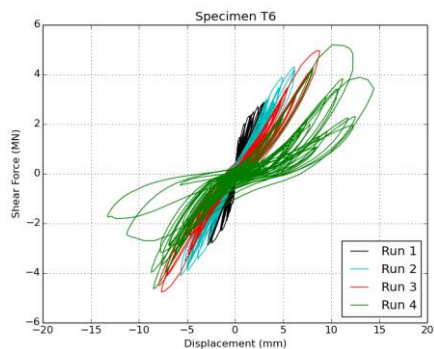
Цикличният нелинеен push over анализ е проведен с нарастващо знакопроменливо натоварване във вид на преместване – фиг. 6.



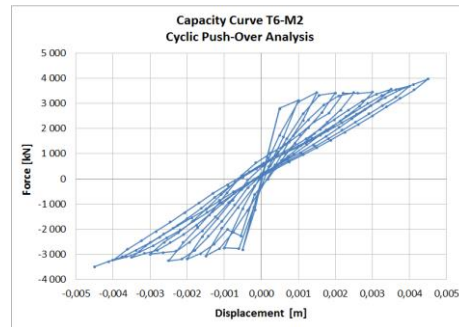
Фиг.6 Натоварване за цикличния анализ

Получените резултати са илюстрирани на фиг. 8. На фиг. 7 са представени експериментално получените резултати.

Големината на числено получената срязваща сила в основата, както и хоризонталното преместване на стената, са от същия порядък като тези, получени от натурните експерименти (за RUN1). При настъпване на по-големи деформации (RUN2 до RUN4) се наблюдава нарастване на броя на итерациите, необходими за намиране на сходимост на решението. Вследствие на невъзможността за числено достигане на по-големи деформации, крайното хоризонталното преместване на стената е значително по-малко от това, получено чрез натурното изпитване на образеца.



Фиг. 7. Експериментални резултати – срязваща сила–преместване



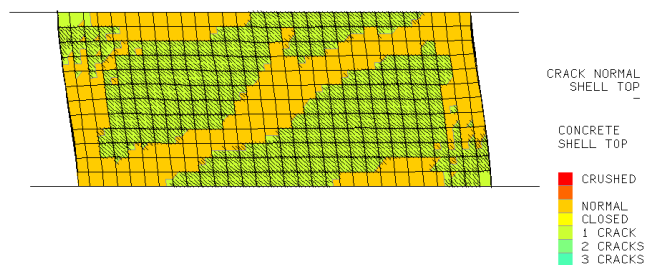
Фиг. 8. Числени резултати – срязваща сила–преместване

На фигури 9 до 11 са показани част от получените резултати както следва:

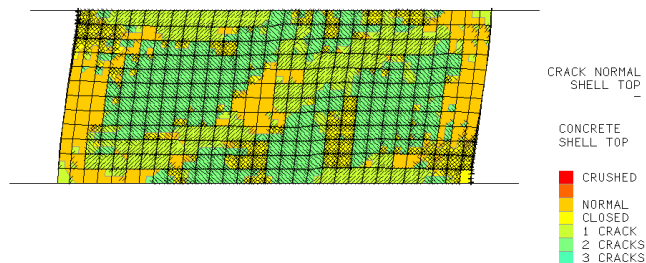
- Показани са деформираните схеми;
- Представени са нормалите към пукнатините (в цвят са илюстрирани три степени на напукване);
- Даден е статусът на бетона (нормален, напукан и смачкан).

Резултатите са представени за няколко момента от анализа:

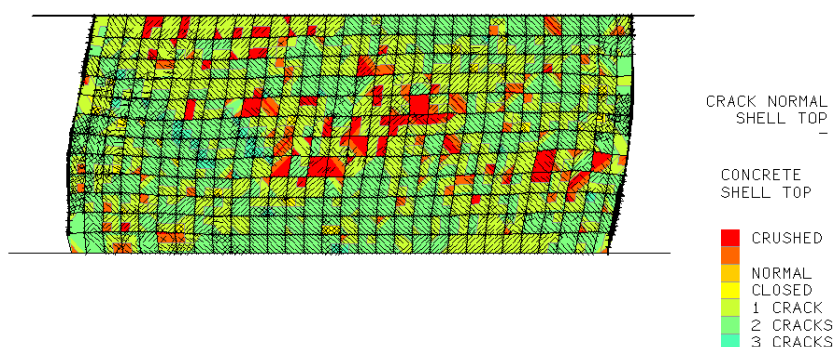
- етап на първоначално напукване на бетона;
- край на численото решение.



Фиг. 9. Резултати за M2 – етап на първоначално напукване на бетона



Фиг. 10. Резултати за M2 – етап на развитие на пукнатините в бетона



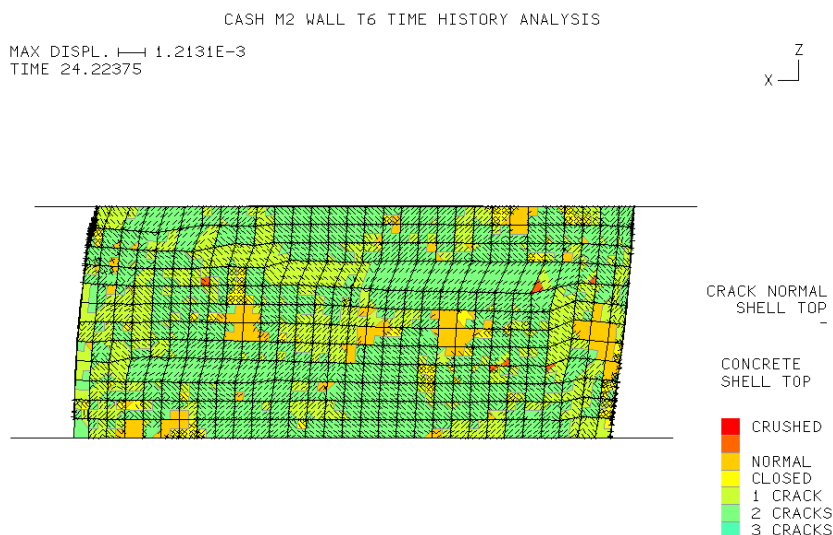
Фиг. 11. Резултати за M2 – край на численото решение

По отношение на граничния капацитет на стената оценката при модел M2 от 4,0 MN е по-ниска от експериментално установената стойност от 5,3 MN.

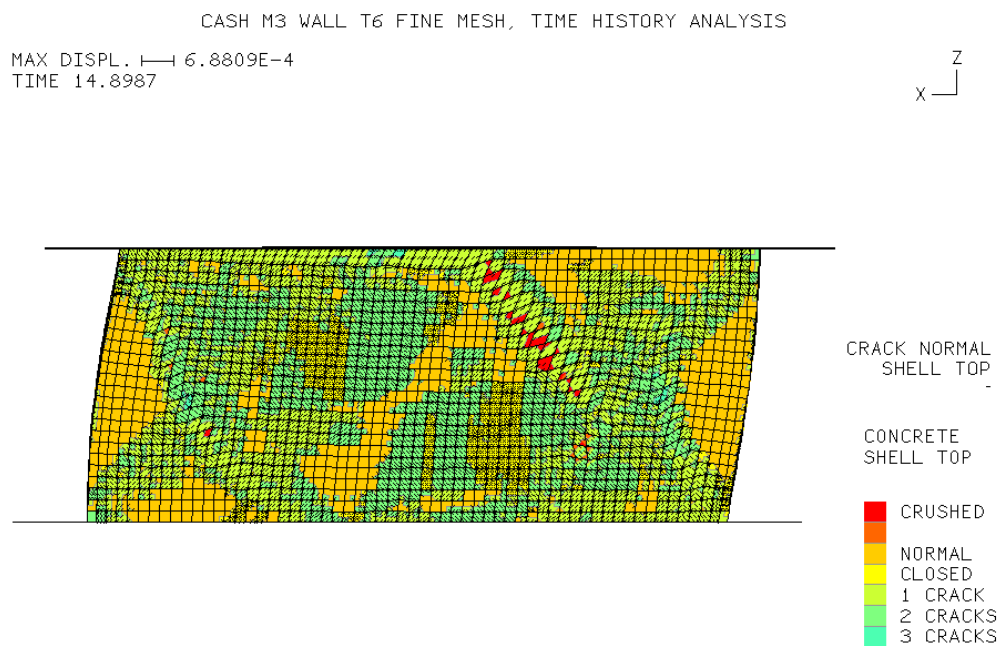
Разпределението на пукнатините и разрушенията от смачкване на бетона е най-интензивно в средната част на стената.

3.3. Резултати от динамичен анализ с акселерограми

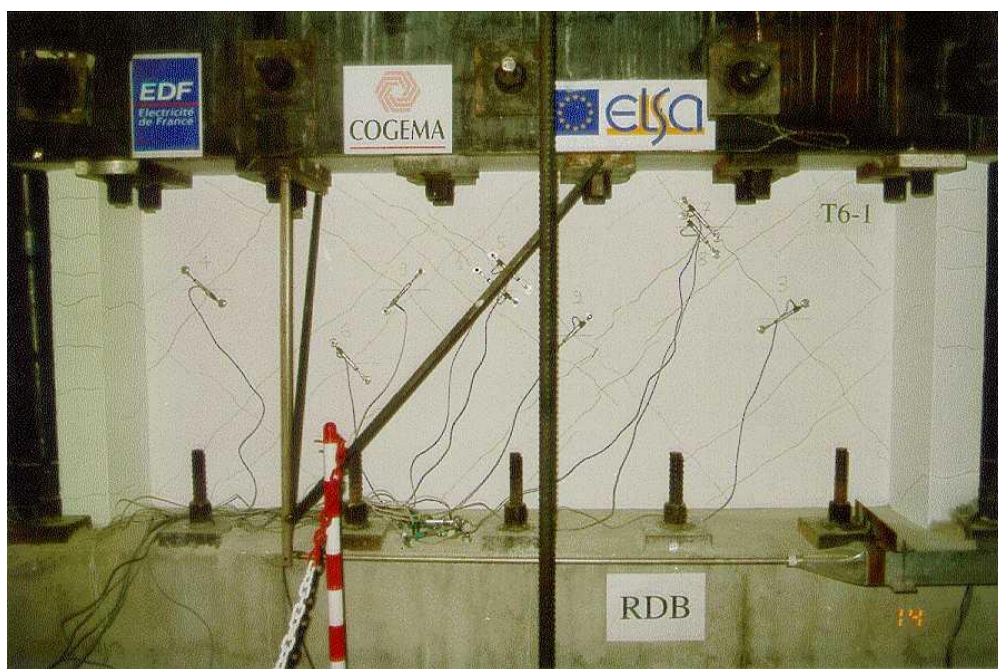
Представени са резултати от изследването на специмент T6 с две различни големина на крайните елементи, M2 (10 cm) и M3 (5cm). Схеми на акумулираните повреди в стената са показани на фиг. 12 и фиг. 13. Прави впечатление, че при модела с по-гъста мрежа доста по-ясно се оформя местоположението на две X-образни пукнатини в системата. Това разпределение на повредите се потвърждава и при експерименталното изследване на стените в лабораторията на ELSA (European Laboratory for Structural Assessment) – фиг. 14.



Фиг. 12. Разрушения в модел M2 – етап на максимални хоризонтални премествания



Фиг. 13. Разрушения в модел М3 – етап на максимални хоризонтални премествания



Фиг. 14. Разпределение на пукнатините от експерименталното изследване

4. Заключение

В тази статия са представени резултати от международен проект **BENCHMARK CASH**. Показани са резултати от изследването на стоманобетонна стена, подложена на статично циклично натоварване, както и на динамично натоварване посредством акселерограма във времето. Числените резултати (срязваща сила, разпространение на пукнатини), получени чрез метода на крайните елементи, се доближават до тези от натурния експеримент, проведен в лабораторията ELSA (European Laboratory for Structural Assessment).

Въз основа на получените резултати могат да се направят някои изводи относно възможностите на използвания софтуер със заложен в него модел на материала бетон (модел на Отосен) и еластопластичния модел за стоманата. По отношение на граничния капацитет на стената (максималната срязваща сила в основата) оценката, получена чрез статичен push over анализ е много добра и може да се използва за инженерни цели. Оценката на максималните премествания е добра. Като плюс за метода може да се изтъкне, че анализът се извършва сравнително лесно и бързо (не изисква много изчислително време).

Цикличният push over анализ подценява с около 25% реалния граничен капацитет на стената, а максималните премествания са по-малки от реално измерените. Получените резултати при динамичния анализ с акселерограми показват невъзможност на софтуера да постигне стабилно числено решение при големи нееластични деформации, вследствие на знакопроменливо натоварване. Разходите на изчислително време са много големи. Като положителен може да се оцени фактът, че програмата дава възможност за последователно проследяване на процеса на първоначална поява и развитие на пукнатините в бетона, както и зоните на смачкването му.

Всички анализи са извършени чрез implicit интеграционен метод. За осигуряване на равновесието (конвергенция) във всяка стъпка от решението се извършват итерации с толеранс, базиран на относителна енергия в системата. В много от анализите, при настъпване на големи деформации се наблюдава нарастване на броя на итерациите, необходими за намиране на сходимост на решението. Вследствие на невъзможността за числено достигане на по-големи деформации, хоризонталното преместване на стената е значително по-малко от това, получено чрез натурното изпитване на образца.

Имайки предвид спецификата на изследването на стоманобетонните стени, а именно достигането на крайно гранично състояние, авторите смятат, че е по-подходящо използването на explicit интеграционен метод, който е по-удачен за проблеми, съпроводени с големи деформации и нелинейности в материалите.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Стефанов, Д., А. Илиев*. Проект „Benchmark CASH” – Цели, задачи и първи резултати. 15-та международна научна конференция BCY‘2015, 2015.
2. SOLVIA Finite Element System, Version 03, User Manual, SOLVIA Engineering AB, Vasteras, 2003.

NONLINEAR ANALYSIS OF EXPERIMENTALLY TESTED SHEAR WALL

A. Iliev¹, D. Stefanov²

Keywords: shear walls, nonlinear response, dynamic analysis, numerical modeling

Research area: earthquake engineering

ABSTRACT

Results are presented from an international project BENCHMARK CASH, with duration of 3 years. In the scope of the project, numerical analyses are done for experimentally tested in European Laboratory for Structural Assessment (ELSA, Joint Research Centre) shear wall.

Capacity curves are received from the type “shear force – displacement”, for monotonic increasing and cyclic loading. The dynamic response in the time is received as a result of dynamic analysis. Different stages are traced consecutively – initial cracking, development of nonlinear deformations until reaching the capacity of the structure. Conclusions and comments are done concerning the potentiality of the software, used in this study.

¹Alexander Iliev, Eng. Ph.D. student, NIGGG-BAS, e-mail: eng.alexander.iliev@gmail.com

²Dimitar Stefanov, Assoc. Prof. Dr. Eng., NIGGG-BAS, e-mail: dstefanov@geophys.bas.bg

