УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
Машински факултет

мр Ивана Д. Бјеловук, дипл.маш.инж.

ФОРЕНЗИЧКА АНАЛИЗА И МОДЕЛИРАЊЕ КАРАКТЕРИСТИКА КРАТЕРА НАСТАЛОГ ПРИ ПОВРШИНСКОЈ ЕКСПЛОЗИЈИ БРИЗАНТНОГ ЕКСПЛОЗИВА

Докторска дисертација

Београд, 2014.

UNIVERSITY OF BELGRADE
Faculty Of Mechanical Engineering

Ivana D. Bjelovuk, MSc. Mech. Eng.

FORENSIC ANALYSIS AND MODELLING OF CHARACTERISTICS OF CRATER EMERGED FROM THE SURFACE EXPLOSION OF BRISANT EXPLOSIVE

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2014.

Комисија за преглед и одбрану:	
Ментор:	проф. др Слободан Јарамаз, редовни професор, Машински факултет Универзитета у Београду
Чланови Комисије:	проф. др Дејан Мицковић, редовни професор, Машински факултет Универзитета у Београду
	проф. др Лазар Кричак, редовни професор, Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду
	проф. др Предраг Елек, ванредни професор, Машински факултет Универзитета у Београду
	др Дарко Васиљевић, виши научни сарадник Институт за физику, Београд
Датум одбране:	_____ 2014.

ПРЕДГОВОР

Овај рад је настао као последица вишегодишњег истраживачког рада у области експлозија убојних средстава са бризантним експлозивом као пуњењем на Машинском Факултету Универзитета у Београду - катедри за војно машинство и системе наоружања и Криминалистичко-полицијској академији у Београду, а под менторством проф. др Слободана Јарамаза, редовног професора Машинског факултета Универзитета у Београду. Експериментална испитивања су реализована у оквиру практичне наставе на Криминалистичко-техничком курсу и Основном курсу за противдиверзиону заштиту Министарства Унутрашњих Послова Републике Србије (МУП РС), на којима сам учествовала у реализацији наставе. Експерименталне експлозије извођене су на полигонима МУП РС – Специјалне Антитерористичке Јединице у Батајници и наставног центра у Митровом пољу на Гочу као и Војске Републике Србије у Бубањ Потоку, а под руководством истакнутих стручњака МУП РС који су вршили иницирање експлозивних пуњења. Овим путем желим да изразим захвалност свим колегама који су ми изашли у сусрет и дали свој допринос изради рада почев од омогућавања приступа стручној литератури, до организације практичне наставе и реализације експерименталних експлозија бризантних експлозива на отвореном простору као и физичко-хемијској анализи трагова експлозива са дна и обода кратера у Националном Криминалистичко-техничком центру МУП РС. До завршетка овог рада дошло је нарочито захваљујући мојој породици која ми је пружала несебичну подршку.

Посебну захвалност дугујем ментору на указаном поверењу, посвећеном времену и неизмерном стрпљењу при професионалном вођењу кроз рад, као и свим члановима комисије на консултацијама.

Београд, јануар 2014. мр Ивана Д. Бјеловук, дипл. маш. инж.

НАСЛОВ: ФОРЕНЗИЧКА АНАЛИЗА И МОДЕЛИРАЊЕ КАРАКТЕРИСТИКА КРАТЕРА НАСТАЛОГ ПРИ ПОВРШИНСКОЈ ЕКСПЛОЗИЈИ БРИЗАНТНОГ ЕКСПЛОЗИВА

РЕЗИМЕ:

Последњих деценија, велики број недозвољених активности спроводи се изазивањем експлозија. Наиме, ефекте експлозије користе терористи за изазивање страха и панике међу становништвом уз људске жртве, материјалну штету, уништавање и онеспособљавање стратегијски важних објеката и сл. као и извршиоци других кривичних дела (изазивање опште опасности, убистава, тешких крађа и др.) када се експлозија користи за савлађивање препрека при провaљивању у куће, станове и друге просторије, за отварање сефова, за сврхе застрашивања појединаца са или без наношења телесних повреда и сл. Ефекти експлозије су вишеструки – као последица бризантног, фугасног, топлотног, парчадног и сеизмичког дејства и углавном се манифестују различитим оштећењима на подлози и околним објектима. Бризантно дејство експлозије изражено је дејством у непосредном окружењу пуњења, и то у виду кратера или отвора у случају површинских експлозија. Од полиције и судских вештака суд тражи одређивање узрока експлозије, те изучавање ефеката експлозије добија на значају. Очекивани допринос овог рада је у области форензичко инжењерство. У прилог оправданости истраживања дата је анализа случајева подметања и активирања експлозивних средстава са последицама у периоду од седам година (2000.-2006.) на територији Републике Србије. Активирање експлозивних средстава било да је у питању намера или нехат изазива штетне последице по околину, те је значајан сваки допринос у прецизнијем утврђивању узрока експлозије на основу трагова, у овом случају кратера. Са форензичког аспекта оштећење у виду кратера је значајно због могућности процене масе коришћеног експлозива за конкретну експлозију, проналажење делова експлозивног средства, узорковање експлозива из кратера ради одређивања врсте експлозива, процене

начина иницирања и др. Димензије и облик кратера су у веома тесној вези са масом и врстом коришћеног експлозива. У досадашњој пракси одређивање масе употребљеног експлозива вршено је коришћењем емпиријских једначина, што није давало апсолутно поуздане резултате. У раду је дат преглед постојећих четрнаест једначина за прелиминарну процену масе експлозива на основу карактеристика кратера и њихова провера кроз резултате конкретних експерименталних експлозија као и вредности одступања од експеримената. Такође, дат је и предлог нових једначина за процену масе експлозива у конкретним условима. Предложене једначине су изведене апроксимацијом експерименталних података и дају мања одступања у односу на до сада коришћене емпиријске. Циљ рада је карактеризација стварања кратера на подлози и корелација улазних параметара (карактеристике експлозива, карактеристике тла) и излазних параметара (кратер) кроз модел. Ова корелација би омогућила одређивање узрока експлозије на основу познатих величина које се могу утврдити на месту експлозије кроз форензичку обраду (врста коришћеног експлозива, карактеристике кратера). Ову анализу за потребе суда раде форензички инжењери, а ради омогућавања суду да утврди намеру извршиоца која је у вези са масом експлозива и прецизније квалификује кривично дело. Приликом истраживања примењени су следећи методи: експериментални метод; метод посматрања, мерења и описивања; метод моделирања насталог кратера као и метод упоређивања модела са експерименталним резултатима. У раду су дати емпиријски и нумерички модели карактеристика кратера у случају површинске експлозије бризантног експлозива засновани на научном приступу, урађени на основу димензионе анализе и резултата експерименталних експлозија као и применом програма *Abaqus*. Емпиријски модели показују пораст вредности запремине кратера са порастом вредности густине и масе коришћеног експлозива док је евидентно опадање вредности запремине катера са порастом вредности густине подлоге на којој се догодила површинска експлозија. Предложени модели дају зависност карактеристика кратера (изражених преко запремине кратера и карактеристика подлоге - густине) и експлозива (изражених преко густине експлозива, контактне површине и масе експлозива) и у поређењу са до сада коришћеним емпиријским моделима дају боље резултате. Нумерички модели дају

задовољавајућа поклапања са експерименталним подацима. Очекивани допринос овог рада је и у датом предлогу дефиниције експлозије са аспекта форензике. Такође, очекује се да резултати овог истраживања унапреде форензичку обраду места експлозије и анализу трагова експлозије у пракси кроз предлог организационе шеме поступања на месту експлозије – обезбеђење места експлозије и форензичку обраду (увиђај) и анализу (вештачење) адекватних трагова која предвиђа и укључење нових субјеката у форензички ланац. Како се у домаћој форензичкој пракси дешавају пропусти и докази бивају оспорени на суду, у раду је указано и на проблеме који се јављају при форензичкој обради и анализи места експлозије као и на несврсисходност прикупљања материјалних доказа уколико они нису обрађени према стандардној процедури уз обавезно успостављање ланца кретања форензичких доказа. Такође, у раду је дат покушај увођења нових уређаја (3Д скенера и ИЦ камере) у редовну процедуру поступања на месту експлозије. Направљен је кратак осврт на методе одређивања запремине кратера и њихова упоредна анализа. Примена 3Д скенера омогућила би прецизније одређивање запремине кратера што је дато упоредним приказом три начина одређивања запремине кратера (апроксимација кратера купом, изливање, 3Д скенирање).

Кључне речи: бризантни експлозив, површинска експлозија, кратер, форензичка обрада места експлозије, експерт, форензичка анализа, моделирање, маса експлозива

Научна област: Машинско инжењерство
Ужа научна област: Војно машинство – системи наоружања

UDK 662.21:343.983(043.3)

TITLE: FORENSIC ANALYSIS AND MODELLING OF CHARACTERISTICS OF CRATER EMERGED FROM THE SURFACE EXPLOSION OF BRISANT EXPLOSIVE

SUMMARY:

In recent decades a large number of illegal activities are performed with the use of explosion. Namely, explosion effects are used by terrorists in order to cause fear and panic among the population along with human victims, material damage, destruction and disabling of strategically important facilities, etc., as well as by the perpetrators of other criminal offences (causing of general danger, murders, aggravated thefts, etc.) when the explosion is used to overcome obstacles when breaking into houses, apartments and other premises, opening the safe deposit boxes and for intimidation of individuals with or without causing bodily injuries, etc. Explosion effects are multiple – as the consequences of brisant, gaseous, heat, fragmentation and seismic effects, and are mostly manifested in various damages on the surface and surrounding propertys. The brisant effect of the explosion is visible in the immediate surroundings of the charge, mostly in the shape of a crater or a hole in cases of surface explosions. The court requests from the police and the experts to determine the exact cause of an explosion, so studying of explosion effects becomes more important. The expected contribution of this paper is in the area of forensic engineering. The analysis of cases of planting and activation of explosive devices, along with their consequences, on the territory of the Republic of Serbia for the period of seven years (2000 – 2006), was provided as a support to the justification for this research. Activation of explosive devices, whether intentionally or out of negligence, causes damage to property so each contribution is important for the more precise determination of the cause of an explosion based on traces, in this case the crater. From the forensic aspect the damage in the form of a crater is important because of the possibility to estimate the mass of the explosive used for the specific explosion, to find pieces of explosive device, to take samples of explosive from the crater in order to determine the type of explosive, to estimate methods of initiation, etc. Dimensions and shape of the crater are closely connected

with the mass and type of the explosive used. Calculation of the mass of the explosive used had commonly been made using empirical equations, which did not give absolutely reliable results. This paper contains the review of the existing fourteen equations for the preliminary estimation of the mass of explosive based on the crater characteristics and revision of their results through specific experimental explosions, with the values of deviations from the experiments. Also it contains the proposal of new equations for estimating of the mass of explosive in given conditions. The proposed equations were derived by function approximation based on experimental data and these equations result in smaller deviations in comparison with the empirical ones used so far. The objective of the paper is the characterization of how the crater forms on the surface and the correlation of input parameters (explosive characteristics, pad characteristics) and output parameters (crater characteristics) through a model. This correlation would enable the determination of the cause of an explosion based on known data that can be determined on the explosion site by the forensic examination (type of the explosive used, crater characteristics). Forensic engineers perform this analysis for the needs of the court in order to determine the intention of the perpetrator depending on the mass of the explosive and for the more precise qualification of a criminal offence. The following methods were used during the research: experimental method, method of observation, measuring and description, method of modelling the generated crater as well as the method of comparison of the model with experimental results. The paper contains empirical and numerical models of crater characteristics in case of surface explosion of a brisant explosive based on scientific approach, and made using dimensional analysis and the results of experimental explosions as well as computer application *Abaqus*. These empirical models show the increase of the value of the crater volume with the increase of the density and the mass values of the explosive used, while the decrease is visible in the value of the crater volume with the demonstrate increase of the density value of the surface on which the surface explosion occurred. The suggested models demonstrate the dependence between the crater characteristics (expressed through the crater volume and surface characteristic as density) and the explosive (expressed with the explosive density, contact surface and mass of explosive) and in comparison to those used so far they give better results. The numerical models adequately match experimental data. The expected contribution of this paper is also in the proposed

definition of an explosion from the perspective of forensics. It is also expected that the results of this research improve forensics investigation and processing of explosion sites in practice through the proposal of an organizational chart of procedural steps to take on an explosion site – securing the explosion site and forensic examination (bomb scene investigation) and analysis (expertise) of adequate traces and introduction of new subjects into the forensic chain that has not been included in the police practise of Serbia. Since in the national forensic practice there have been oversights and evidence have been challenged at the court, this paper points out the problems that occur during the forensic investigation and analysis of an explosion site, as well as indicating how pointless it is to gather physical evidence if they were not processed in accordance with the standard procedure with the mandatory establishing of the chain of forensic evidence. This paper also provides the attempt to introduce new devices (3D scanners and IR cameras) into regular procedure on an explosion site. A short overview and comparative analysis were made of the methods for the crater volume determination. The use of the 3D scanner would enable more precision in crater volume determination as shown by a comparative review of three methods of the crater volume determination (cone approximation of the crater, casting, 3D scanning).

Keywords: brisant explosive, surface explosion, crater, bomb scene investigation, expert, forensic analysis, modeling, explosive charge mass

Scientific field: Mechanical Engineering

Narrow scientific field: Military Mechanical Engineering – weapon systems

UDK 662.21:343.983(043.3)

Садржај:

ПРЕДГОВОР I
РЕЗИМЕ: II
SUMMARY: V
1. УВОД – ОСНОВНИ ПОЈМОВИ О КРИМИНАЛИСТИЦИ, ФОРЕНЗИЦИ И ФОРЕНЗИЧКОМ ИНЖЕЊЕРСТВУ 1
2. ПРОБЛЕМ ИСТРАЖИВАЊА ПОВРШИНСКЕ ЕКСПЛОЗИЈЕ БРИЗАНТНОГ ЕКСПЛОЗИВА 7
2.1 Метод научног истраживања 10
2.2 Полазне хипотезе 11
2.3 Очекивани научни и стручни допринос 12
2.4 Практична применљивост и оправданост истраживања исказана кроз број експлозија средстава на територији Републике Србије 14
3. ФОРЕНЗИЧКА АНАЛИЗА МЕСТА ЕКСПЛОЗИЈЕ 21
3.1 Основни појмови о експлозији, дефиниција експлозије 21
3.2 Форензичка обрада места експлозије 23
3.3 Форензичка анализа трагова експлозије 34
3.4 Кратер као траг експлозије 41
4. ПРЕТХОДНА ИСТРАЖИВАЊА У ВЕЗИ СА РЕЛАЦИЈАМА ИЗМЕЂУ КАРАКТЕРИСТИКА КРАТЕРА, ТЛА И ЕКСПЛОЗИВА И ПРЕГЛЕД ПОСТОЈЕЋИХ МАТЕМАТИЧКИХ МОДЕЛА ЕФЕКАТА ЕКСПЛОЗИЈЕ 46
4.1 Нумерички модели ефеката експлозије 54
4.2 Димензиона анализа у проблемима ефеката експлозије 60
5. ФОРМУЛИСАЊЕ МОДЕЛА ЗАВИСНОСТИ КАРАКТЕРИСТИКА КРАТЕРА ОД КАРАКТЕРИСТИКА ЕКСПЛОЗИВА И ПОДЛОГЕ НА БАЗИ ДИМЕНЗИОНАЛНЕ АНАЛИЗЕ ПРОБЛЕМА ПОВРШИНСКЕ ЕКСПЛОЗИЈЕ .. 64
6.ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА – МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД 71
6.1 Физичке карактеристике подлоге на којој су извођене експерименталне експлозије 72
6.2 Карактеристике експлозива и средстава за иницирање коришћених у експерименталним експлозијама 74

6.3 Карактеристике осталих уређаја коришћених у експериментима 76
6.4 Ток и резултати експеримента..... 77
7. МОДЕЛИРАЊЕ КАРАКТЕРИСТИКА КРАТЕРА ПРИ ПОВРШИНСКОЈ ЕКСПЛОЗИЈИ..... 98
7.1 Провера постојећих емпиријских релација између масе експлозива и карактеристика кратера кроз експерименталне резултате..... 99
7.2 Зависност масе коришћеног експлозива и запремине кратера добијена апроксимацијом криве из експерименталних података 119
7.3 Зависност масе коришћеног експлозива, запремине кратера и контактне површине добијена апроксимацијом криве из експерименталних тачака 142
7.4 Интерполација карактеристика кратера у програму MATLAB 155
7.5 Нумеричко моделирање стварања кратера површинском експлозијом бризантног експлозива 162
8. ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА И ВЕРИФИКАЦИЈА ПРЕДЛОЖЕНИХ МОДЕЛА 177
9. ЗАКЉУЧЦИ..... 192
ЛИТЕРАТУРА 198
ПРИЛОЗИ..... 208
ПРИЛОГ 1: Број случајева експлозија на територији Републике Србије по градовима у периоду од 2000. закључно са 2006. годином 209
ПРИЛОГ 2: Резултати хемијских анализа бризантних експлозива: ТНТ, Пентрита и Амонекса 218
2.а Анализа узорака ТНТ узетих са дна кратера танкослојном хроматографијом..... 218
2.б ТНТ и Пентрит стандард испитиван танкослојном хроматографијом 219
2.в ТНТ стандард испитиван гасном хроматографијом 220
2.г ТНТ стандард испитиван инфрацрвеном спектрофотометријом..... 221
2.д Анализа узорака ТНТ узетих са дна кратера масеном спектрометријом 222
2.ђ Пентрит стандард испитиван инфрацрвеном спектрофотометријом..... 223
2.е Стандард амонијум нитрата испитиван инфрацрвеном спектрофотометријом 224
ПРИЛОГ 3: Упоредни приказ резултата запремина кратера насталих површинском експлозијом бризантних експлозива 225
ПРИЛОГ 4: MATLAB Code за појединачне експлозије бризантних експлозива ТНТ, пентрита и амонекса-1 на земљи, бетону и асфалту..... 227

4.1 MATLAB Code - Случај експлозије ТНТ на земљи: 227
4.2 MATLAB Code - Случај експлозије пентрита на земљи: 230
4.3 MATLAB Code - Случај експлозије Амонекс1 на земљи: 233
4.4 MATLAB Code - Случај експлозије ТНТ на бетону: 237
4.5 MATLAB Code - Случај експлозије пентрита на бетону: 239
4.6 MATLAB Code - Случај експлозије Амонекс1 на бетону: 241
4.7 MATLAB Code - Случај експлозије ТНТ на асфалту: 243
4.8 MATLAB Code - Случај експлозије пентрита на асфалту: 245
4.9 MATLAB Code - Случај експлозије Амонекс1 на асфалту: 247
ПРИЛОГ 5. Изјава о ауторству 249
ПРИЛОГ 6: Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада 250
ПРИЛОГ 7. Изјава о коришћењу 251
БИОГРАФИЈА 253

Номенклатура:

A – JWL параметар (параметар у *Jones-Wilkins-Lee* једначини стања)

a - параметар у апроксимационој функцији

a_{ij} - реални бројеви који представљају коефицијенте система a_{ij}

b_i – константе

b - параметар у апроксимационој функцији

B – JWL параметар (параметар у *Jones-Wilkins-Lee* једначини стања)

c - константа

D – детерминанта система

$d[m]$ – пречник кратера

$d_1\ [m]$, $d_2\ [m]$ - осе елипсасте основе кратера

$F_c\ [N/m^2]$– чврстоћа бетона

f, f_1, f_2 - функција

$g[m/s^2]$ - убрзање земљине теже

$h\ [m]$ - дубина кратера

k, k_1,k_2,k_3, k_4, k_5, k_6, k_7 – константе у емпиријским једначинама за процену масе експлозива

L – ознака димензије дужине

M – ознака димензије масе

$m_e[kg]$ – маса експлозивног пуњења

$M_e[kg]$ – маса експлозивног пуњења добијена апроксимацијом експерименталних података

m – број линеарних алгебарских једначина са n непознатих $x_1,x_2,...,x_n$.

n – број експеримената

N – број тачака у дијаграму претпостављене функције $M_e=M_e(V_k)$

$n = r/h$ однос димензија кратера (пречника и дубине кратера)

$p\ [N/m^2]$- притисак

$P_k[m^2]$ - контактна површина подлоге и експлозивног пуњења

p_0, p_1, p_2 - коефицијенти тла

$[J/kg]$ – топлота експлозије

$r\ [m]$ – радијус/полупречник кратера

$R_d\ [m]$ - радијус зоне деструкције

$r_e\ [m]$ – полупречник полусферног експлозивног пуњења

R_1 , R_2 , w – JWL параметри у *Jones-Wilkins-Lee* једначини стања

R_f – референтна вредност која се односи на пређени пут узорка при испитивању експлозива танкослојном хроматографијом

$S(a_o,a_1, ..., a_n)$ – збир квадрата девијација

$s_1,s_2,...,s_n$ - низ бројева који представљају решење система једначина

$S_1,S_2,...,Sк$ - скуп решења хомогеног система једначина

T – ознака димензије времена

$t\ [s]$- време

$t_o[s]$ – почетни тренутак времена

$V_k\ [m^3]$- запремина кратера

$V_H[m^3]$- запремина кратера *(Holsapple)*

$, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \pi_1,\pi_2, ...\pi_n$ – бездимензионе величине

$\rho_e\ [kg/m^3]$ - густина експлозива

$\rho_{tla}\ [kg/m^3]$ - густина тла

$\rho_к[kg/m^3]$ – густина каменчића

$\rho_z[kg/m^3]$ – густина земље

φ - угао унутрашњег трења тла

1. УВОД – ОСНОВНИ ПОЈМОВИ О КРИМИНАЛИСТИЦИ, ФОРЕНЗИЦИ И ФОРЕНЗИЧКОМ ИНЖЕЊЕРСТВУ

Формацијска и импровизована експлозивна средства по својој распрострањености, разноврсности и трагичним последицама које остављају, могу се појавити као средства, предмет или као начин извршења (*modus operandi*) разних кривичних дела и код нас и у савременом свету. Експлозивна средства се могу користити у случајевима најтежих кривичних дела као што су тероризам, убиство, покушај убиства, наношење тешких телесних повреда, изазивање опште опасности, тешка крађа и др. Наиме, многи извршиоци кривичних дела користе експлозију и пожар да би прикрили своје дело у нади да ће трагови, који би их открили, бити уништени дејством притиска и топлоте. „У форензичкој пракси било је случајева када је, у намери да уништи трагове свог кривичног дела (нпр. убиства), извршилац темпирао експлозивну направу да се активира у тачно одређено време, када је он већ себи осигурао алиби“ (Evans, 1996). Извршиоци појединих кривичних дела понекад користе ефекте експлозије за постизање својих циљева. Тако терористи снажним дејством експлозије постижу ширење страха и панике међу становништвом, стварају велике материјалне штете и људске жртве ради остваривања политичких, верских или неких других циљева. Неки извршиоци кривичног дела убиства експлозив користе као средство извршења како би одређену особу лишили живота, (нпр. постављањем експлозивне направе на подлогу испод паркираног моторног возила, под прозор, у двориште и сл.), док извршиоци кривичног дела тешка крађа експлозив користе ради савладавања препреке да би дошли до новца или неких других драгоцености (активиран експлозив створиће отвор на зидовима касе или неке друге подлоге). „Из историје дешавања у XX и XXI веку познато је да је највећи број терористичких и других акција реализован употребом експлозива, муниције и импровизованих експлозивних средстава.“ (Радић, 2011). Последњих година експлозивна средства постала су избор оружја бројних терористичких напада. (Remennikov, 2003;

Ambrosini et.al., 2002; Ambrosini et.al., 2004; Ambrosini & Luccioni, 2008; Ambrosini & Luccioni, 2012;) Фактори као што су доступност информација како израдити експлозивно убојно средство, нарочито на интернету, релативно лака израда, његова расклопивост и покретљивост у смислу могућности израде средства малих габарита, илегална доступност експлозивних материја, значајна способност стварања смртних последица и рањавања људи као и оштећења објеката одговорни су за пораст броја тзв. бомбашких напада широм света.

Све већа употреба експлозивних убојних средстава при извршењу појединих кривичних дела и све већи напредак науке и технике који се, нажалост, користи и у изради ових средстава, изискује укључивање више субјеката у идентификацију извршиоца и доказивање кривичног дела. Зато је неопходна сарадња свих учесника у одређивању узрока и одговорности за експлозију и то: суда, тужилаштва, полиције, експерата криминалистике, форензичког инжењерства, хемије и др.

Криминалистика се бави идентификацијом извршилаца и доказивањем извршења кривичних дела. Прецизније, она се дефинише као „наука која проучава, проналази и усавршава научне и на практичном искуству засноване методе и средства, која су погодна да се открије и разјасни кривично дело, открије и приведе кривичној санкцији учинилац, обезбеде и фиксирају сви докази ради утврђивања објективне истине, као и да се спречи извршење будућих планираних и непланираних кривичних дела.“ (Водинелић, 1984) У стручној литератури може се наћи да криминалистика представља један сегмент знатно шире области – форензике (*Forensic Science*). (Lee, 1998) Најшира дефиниција форензике подразумева примену науке и научних чињеница у правосудним проблемима. (Brenner, 2004:118) Форензика се може дефинисати и као примена науке у кривичном и грађанском правосуђу. Форензика - лат. *forensis* који је на тргу, јавни, који служи судском истражном и доказном поступку (Алексић, et.al., 2004) са лингвистичког аспекта има порекло од назива трга у старом Риму – *Forum Romanum*, где су се износиле чињенице у вези неког судског спора од стране одбране и тужилаштва, што је претеча данашњег изношења чињеница у судском поступку. Према Клајну и Шипки термин *форензички* односи се на примену

науке, посебно медицине, у истраживању кривичних дела. (Клајн & Шипка, 2000) Форензичка наука представља примену природних наука у правном контексту (Коларевић, 2008.) *Saferstein* дефинише форензику као "...примена науке у области кривичноправних и грађанскоправних процеса и које у оквиру кривичног правосуђа спроводи полиција." (Saferstein, 2007) Сталним напретком науке и технике важност материјалних трагова у расветљавању кривичних дела и догађаја ће свакако расти. (Lee & Harris, 2000)

Траговима, а који касније прерастају у материјалне доказе, баве се форензичари. Обично се за термин научник-форензичар везује научник у лабораторији која ради за потребе правосуђа. Према Клајну и Шипки „форензичар је научник који помаже полицији у истрази“. Пошто такве лабораторије углавном раде анализе трагова кривичних дела/догађаја, а који по изласку из лабораторије на суду представљају материјалне доказе, оне се називају и форензичке/криминалистичке лабораторије. У свету, неке од тих лабораторија функционишу као саставни део Министарства унутрашњих послова – криминалистичке полиције, друге су у оквиру Министарства правде – тужилаштва, док неке лабораторије функционишу као независне. Не може се препознати универзални модел функционисања једне форензичке лабораторије/центра. Без обзира под чијом су надлежношћу, у њима раде научници различитих образовних профила. У складу са наведеним, форензика се може поделити на разне научне дисциплине из области природних, техничких, технолошких, па и друштвених наука. Тако у оквиру једног форензичког центра постоји више лабораторија нпр. за физичко-хемијска испитивања (покрива дисциплине као што су форензичка физика, форензичка хемија, форензичка геологија и сл.), за биолошка испитивања (форензичка биологија, форензичка екологија, форензичка ентомологија и сл.), токсиколошка лабораторија (форензичка токсикологија), за медицинске прегледе и обдукције (форензичка медицина), лабораторија за стоматолошке прегледе, испитивања и идентификацију на основу зуба (форензичка одонтологија), лабораторија за идентификацију лица на основу отисака прстију (форензичка дактилоскопија), лабораторија за психијатријска испитивања (форензичка психијатрија), лабораторија за полиграфска тестирања (форензичка психологија), лабораторија за анализу људског гласа (форензичка фонетика и форензичка лингвистика),

фотографска лабораторија (форензичка фотографија), лабораторија за испитивање докумената, лабораторија за компјутерску и дигиталну анализу (компјутерска и дигитална форензика), балистичка лабораторија (форензичка балистика) и лабораторија за испитивање ломова, пожара и експлозија, анализу саобраћајних незгода (форензичко инжењерство) и др[1]. Тако се и развијају многе форензичке дисциплине које представљају примену одговарајуће научне дисциплине у сврхе правосуђа.

Постоји много форензичких дисциплина међу којима је и форензичко инжењерство. (Машковић, 2010) Форензичко инжењерство је форензичка дисциплина која подразумева „практичну примену научних и математичких принципа и традиционално је подељена на добро познате дисциплине: грађевинско, машинско, хемијско, електрично и металургијско инжењерство. Последњих година XX века развијају се и биомедицинско инжењерство, компјутерска и информатичка наука и наука о материјалима.“ (Batterman & Batterman, 2006) *Noon* даје дефиницију форензичког инжењерства као „примену инжењерских принципа и метода у давању одговора на питања о чињеницама у вези са незгодама, кривичним делима, катастрофама, деградацијом својине и разних врста ломова“. (Noon, 2001:1) *Specter* форензичко инжењерство дефинише као „вештину и науку професионалне праксе квалификованих инжењерских стручњака који раде за потребе суда или у арбитражном поступку“.[2] Главни циљ инжењерства уопште је безбедна конструкција и минимизирање одн. елиминација вероватноће ломова и отказа како целог система тако и сваке његове компоненте. Уколико неки од инжењерских система откаже, било да је то зграда, мост, брана, свемирски брод, возило и сл., било да се деси пожар или експлозија, може доћи до повређивања или страдања људи. Основна улога форензичког инжењерства је разумевање узрока и утврђивање одговорности у таквим ситуацијама. Утврђивање узрока, тока и последица експлозије предмет су проучавања форензичког инжењерства.

[1] Опширније о форензичким лабораторијама видети на сајту Европског удружења форензичких института: (ENFSI – European Network of Forensic Science Institutes http://www.enfsi.com , доступан 08.3.2012.)

[2]Specter, M. M. (1987) National Academy of Forensic Engineers, *Journal of Performance of Constructed Facilities* (ASCE) 1, No. 3 citirano prema: Carper K. (2001) Forensic Engineering, CRC Press LLC, Boca Raton, p.1

Као и за све остале професије, за инжењерство је карактеристична дугогодишња озбиљна припрема кроз студије, с тим да форензичко инжењерство захтева додатну специјализацију (Carper, 2001:361). Форензички инжењер је лице које је по професији инжењер, али се у суштини бави инжењерским аспектима правних проблема. У правосуђу, мишљење форензичара – инжењера може бити од пресудног значаја у вези са утврђивањем нечије кривице. Сходно томе, он мора бити упознат са правним процедурама као и шта се од њега очекује када се на суду појави у својству експертског сведока/вештака. Такође, мора бити спреман да на суду образлаже своје ставове и да инжењерским лаицима (судијама, тужиоцима, адвокатима и др.) приближи техничку струку и детаље у конкретном случају ради подробнијег разумевања проблема. Он се мора припремити за излагање свог сведочења на суду и треба да буде спреман да одговара на постављена питања. Из напред наведеног да се закључити да је форензичко инжењерство, које се може грубо дефинисати као инжењерство примењено у сврхе правосуђа, једна веома широка дисциплина.

Допринос овог рада је у оквиру области форензичко инжењерство.

Прикупљање трагова за форензичку анализу експлозије врши се кроз форензичку обраду места догађаја као полазну тачку за успешно коришћење трагова кривичног дела/догађаја у форензичким лабораторијама али и за коришћење информација у оперативне (детективске) сврхе. Свака грешка начињена на месту догађаја има утицаја и на остале делатности које имају за циљ откривање извршиоца и доказивање кривичног дела, те је од изузетног значаја да место догађаја буде правилно обрађено. (Plaatt, 2003) Тако је у случају експлозија од изузетног значаја квалитетна форензичка обрада места и анализа трагова експлозије као први корак утврђивања како је до експлозије дошло, односно шта је узрок експлозије и ко је за њу одговоран.

У овом раду реч је о површинским експлозијама бризантних експлозива, те ће бити приказани експерименти површинских експлозија познатог бризантног

експлозива на различитим подлогама чији је циљ давање корелације између карактеристика кратера као последице експлозије и карактеристика експлозива и подлоге. Изабрана експлозивна пуњења су од тротила - TNT, пентрита - PETN као представника војних експлозива и Амонекса1 као представника привредних експлозива. За подлоге на којима су извођене експерименталне експлозије изабране су земља, бетон и асфалт јер се у форензичкој пракси највише експлозија са кратером као последицом догађа на тим површинама. Бетон и асфалт су карактеристични за експлозије у урбаним срединама.

2. ПРОБЛЕМ ИСТРАЖИВАЊА ПОВРШИНСКЕ ЕКСПЛОЗИЈЕ БРИЗАНТНОГ ЕКСПЛОЗИВА

У случајевима терористичких напада и другим кривичним догађајима у којима су ефекти експлозије коришћени за постизање циља извршиоца, информације које се при форензичкој обради места експлозије могу добити из кратера – последице бризантног дејства експлозије, су од изузетног значаја. То може бити податак о центру експлозије, врсти и начину иницирања коришћеног експлозивног средства, маси експлозива, (са форензичког - инжењерског аспекта), врсти експлозива (са форензичког физичко-хемијског аспекта) или извршиоцу кривичног дела (са форензичког - криминалистичког аспекта). Ови подаци могу се добити испитивањем локације, облика и димензија кратера, али и других трагова – последица експлозије, а кроз форензичку обраду и анализу. Податак о коришћеној маси експлозива користан је за суд јер је у директној вези са опредељењем извршиоца да учини кривично дело одређене „тежине“, тј. са мањим или већим последицама. Познавање масе коришћеног експлозива олакшава изрицање пресуде и утврђивање одговарајуће санкције од стране суда. Већа маса експлозива указује на намеру наношења веће материјалне штете, тешких телесних повреда или смртних последица, већег броја рањених и смртно страдалих, извршење терористичког акта и сл. (Бјеловук, и др., 2012; Жарковић, и др., 2012)

Сам процес стварања кратера при површинској експлозији бризантног експлозива није често описиван у доступној техничкој литератури. Више је доступних истраживања која се односе на подземне експлозије, а мањи број односи се на површинске експлозије. (Iturrioz & Riera, 2001, Ambrosini, et. al., 2005) Фонд знања из области експлозија углавном лежи у владиним архивама и службама за тестирање оружја и других ратних средстава. Неки од извештаја о резултатима истраживања окарактерисани су као поверљиви и са ограниченим приступом дозвољеним искључиво владиним агенцијама, што се јавља као додатни проблем при истраживању. (Ambrosini et al., 2002; Ambrosini et al., 2004) У последње време неки резултати ранијих лабораторијских тестирања и важни технички извештаји

објављени су од стране америчких војних служби и могу се наћи на интернету[3]. Такође, одржаване су и конференције на тему експлозија, али резултати нису били широко дистрибуирани. За поједине конференције доступан је зборник апстраката. Као додатна потешкоћа у истраживању јавља се и чињеница да је резултате објављених истраживања (нпр. резултате рада *US Army Research Laboratory*) могуће цитирати уз званично одобрење *US Army* или владе САД што је на крају неких текстова и наглашено (Gee, et.al., 2007).

Такође, приликом истраживања наилази се на проблеме при извођењу експеримената. Наиме, реалне експерименталне експлозије које подразумевају коришћење бојевих експлозива веома су захтевне за спровођење како у смислу припреме и организације експеримената тако и у смислу потребних материјалних средстава (набавка и превоз експлозива, потребна специфична опрема за мерење која треба да издржи огромна оптерећења удара за време експлозије, физичко обезбеђење особља и опреме, обезбеђење присуства медицинске и ватрогасне екипе ради њиховог евентуалног ангажовања у случају неконтролисаних ситуација на полигону и др.). Извођење експерименталних експлозија носи и веома велике безбедносне ризике с обзиром да су експлозиви опасне материје. Транспорт и руковање опасним материјама регулисани су законом.

Предмет истраживања у овом раду је ефекат експлозије на подлогу, конкретно формирање кратера при експлозији пуњења постављеног на површину подлоге (површинска експлозија која подразумева нулту дубину укопавања - *height of burst*). Површинска експлозија (*surface explosion, ground burst*) подразумева експлозију неког експлозивног пуњења које је постављено на површину неке подлоге, тј. када није укопано у подлогу и постављено на одређену дубину, већ слободно постављено и једном страном додирује подлогу.

Површинском експлозијом сматрају се и експлозије код којих је експлозивно пуњење лоцирано веома близу тла (Remennikov, 2003). У овом раду разматраће се само површинске експлозије код којих постоји контакт експлозивног пуњења и подлоге на коју је постављено.

[3] www.dtic.mil доступан 13.8.2011. и сл. сајтови

Импулсна оптерећења настала као резултат експлозије доводе до стварања кратера на подлози. Површинска експлозија подразумева динамичко оптерећење на подлогу које се одвија врло великом брзином. То динамичко оптерећење резултује степеном оптерећења који наговештава у веома кратком времену динамичко понашање материјала подлоге и окарактерисано је углавном великим пренапрезањем у поређењу са нормалним статичким напрезањем. Одговор подлоге и механизам формирања кратера је сложен с обзиром на анизотропност, нелинеарност и променљивост механичких карактеристика већине подлога на којима се реално одвијају експлозије, а и које су изабране за испитивање. Генерално, морала би се извести разна поједностављења да би се решио проблем одређивања узрока експлозије на основу карактеристика кратера. До сада, већина оваквих практичних проблема решавана је кроз емпиријске приступе. Како се индустријска и војна техника развијала, рађена су истраживања експлозија, што је резултирало разним дијаграмима и емпиријским једначинама (Baker, et.al., 1983). Тако су објављени корисни алати за проучавање ефеката експлозија, процене масе коришћеног експлозива у терористичком нападу или некој другој врсти кривичног дела/догађаја, а на основу регистрованог оштећења на подлози и околини. Већина рађених истраживања у свету односи се на подземне експлозије, а само неколико радова тиче се експлозија на површини подлоге. Код доступних резултата истраживања о формирању кратера - последица експлозије велика већина информација базирана је на експерименталним истраживањима (Iturrioz & Riera, 2001, Luccioni et.al., 2010).

Са форензичког аспекта оштећења у виду „кратера“ су значајна, између осталог, и због могућности процене масе коришћеног експлозива за конкретну експлозију за потребе суда. Карактеристике кратера - димензије, облик и запремина кратера су у веома тесној вези са масом и врстом коришћеног експлозива. У досадашњој пракси одређивање масе употребљеног експлозива вршено је коришћењем емпиријских израза за прорачун, на основу којих нису увек добијани поуздани резултати. Ради што прецизнијег одређивања узрока експлозије потребна је претходна правилна форензичка обрада места експлозије (проналажење и

фиксирање свих трагова - последица експлозије и прикупљање информација) и позната врста коришћеног експлозива.

Циљ истраживања је карактеризација стварања кратера на подлози и корелација улазних параметара (експлозив, тло) и излазних параметара (кратер) кроз модел, што би послужило за прецизније одређивање узрока експлозије на основу кратера, конкретно масе коришћеног експлозива. У овом раду биће дати емпиријски и нумерички модел карактеризације кратера, као последица постављања импровизованог средства са бризантним експлозивом као пуњењем без кошуљице на подлогу, а који је заснован на научном приступу.

2.1 Метод научног истраживања

Како се свако научно истраживање базира на одређеним методама, то су и у овом истраживању форензичке анализе и моделирања карактеристика кратера, последица површинских експлозија коришћене следеће методе истраживања:

- експериментални метод;
- метод посматрања, мерења и описивања кратера;
- метод моделирања карактеристика кратера (емпиријски и нумерички);
- поређење модела са експерименталним резултатима.

Експериментални метод примењен је тако што су извођене реалне површинске експлозије (пуњења амонекса1, ТНТ и пентрита) на различитим подлогама након чега су посматрани и мерени резултати – димензије кратера. Предложени су нови модели карактеристика кратера који су упоређивани са експерименталним резултатима и ранијим моделима.

Метод научног истраживања начелно подразумева процес индукције одн. поступак формирања теорије којом би се објасниле запажене чињенице, те су и у овом раду формиране могуће теорије – хипотезе од којих се пошло у истраживању.

2.2 Полазне хипотезе

У овом раду као полазне хипотезе изабране су оне најједноставније, а које су у најбољем складу са познатим и регистрованим фактима. Дејство експлозије на околину одређено је предајом количине кретања гасовитих продуката честицама околине у веома кратком времену трајања процеса експлозије при чему су велике вредности брзине деформације. Површинска експлозија бризантног експлозива за то време ће разбити и избацити део подлоге и створити кратер одређене запремине бризантним дејством експлозива на подлогу са којом је у контакту.

Основна хипотеза у раду је да карактеристике кратера, исказане преко димензија одн. запремине кратера, зависе од врсте и масе коришћеног експлозива, али и карактеристика тла као што је густина. Врста експлозива описана је физичким карактеристикама густином ($\rho_e[kgm^{-3}]$) и топлотом експлозије ($Q_e[Jkg^{-1}]$) док је подлога окарактерисана густином ($\rho_{tla}[kgm^{-3}]$). Карактеристике кратера су у директној зависности са карактеристикама експлозива (са растом густине и топлоте експлозије експлозива расте и величина кратера), док су у обрнутој сразмери са густином као карактеристиком подлоге (са растом густине подлоге опада вредност величине запремине кратера). И експлозив и подлога сматрани су хомогеним (карактеристике су им константне у свим деловима). Такође, за једну од хипотеза усвојено је да на величину запремине кратера, као једне његове карактеристике, утиче и вредност контактне површине на тај начин што ће већа вредност контактне површине у случају постављања исте масе експлозива дати већу вредност запремине кратера. У овом истраживању разматрају се мале експлозије (маса експлозивног пуњења мања од $10kg$) и примењена је претпоставка да гравитација не утиче на карактеристике кратера. Карактеристике подлоге не зависе од силе Земљине теже већ од међумолекулских веза честица подлоге. Такође је усвојена и претпоставка да се експлозив разлаже на гасовите продукте одн. да важи једначина стања *Jones-Wilkins-Lee*. Претпоставља се да ће развијени модел потврдити хипотезу о директној сразмери димензија одн. запремине оштећења подлоге у виду кратера и масе коришћеног експлозива и обрнутој сразмери димензија/запремине кратера и густине подлоге, као и

директној зависности запремине кратера и контактне површине експлозива и подлоге.

2.3 Очекивани научни и стручни допринос

Резултати истраживања требало би да омогуће стварање корелације између запремине кратера, карактеристика тла и коришћеног експлозива у смислу утврђивања узрока експлозије, али и предвиђање исхода експлозивног процеса на површини подлоге у случају познате врсте и масе експлозива и врсте подлоге.

Модел, као поједностављени апстрактни приказ реалне експлозије на површини тла, је од кључног значаја за разумевање феномена површинских експлозија и представља унапређење научне области војног машинства - система наоружања и форензике/криминалистике. Добијени резултати требало би да омогуће прецизнију процену масе коришћеног експлозива на основу кратера (проблем форензичког инжењерства), што представља значајан стручни допринос унапређењу војне инжењерске праксе и форензичког инжењерства.

Очекивани допринос овог рада је и у предлогу дефиниције експлозије са аспекта форензике.

Имајући у виду функцију полиције у откривању извршиоца и доказивању кривичног дела, јавља се потреба за унифицирањем поступања припадника полиције и свих других субјеката који учествују у расветљавању експлозија почев од добијања обавештења да се догодила експлозија, обезбеђења и форензичке обраде места експлозије (фиксирање затеченог стања – израда записника о увиђају и извештаја о форензичком прегледу лица места, фотодокументације, скице и ситуационог плана, изузимања трагова са лица места), паковања, транспорта и чувања изузетих трагова до њихове форензичке анализе у лабораторији. Резултати ових истраживања требало би да унапреде и форензичку обраду и анализу места експлозије кроз предложену организациону шему поступања на месту експлозије - обезбеђења места експлозије, вршења увиђаја

(форензичка обрада) и вештачења (форензичка анализа) трагова, а која предвиђа и укључивање нових субјеката као нпр. сектор за ванредне ситуације МУП РС. Такође, шема детаљно објашњава поступање на месту експлозије полазећи од чињенице ко све треба да је обавештен о експлозији, процене ризика од нових експлозија, обезбеђења места експлозије, обраде трагова, прикупљања обавештења и састављања одговарајућих писмена као и формирања материјалних и личних доказа који представљају основ за подношење кривичне пријаве. У раду је представљен и покушај увођења нових уређаја (3Д скенера и ИЦ камере) у стандардну процедуру обраде места експлозије уз поштовање ланца кретања форензичких доказа (*chain of evidence*). Такође, очекивани допринос овог рада је и у анализи постојећих емпиријских једначина и процене њихове поузданости али и предлог нових зависности карактеристика кратера од карактеристика подлоге и карактеристика експлозива у форензичкој анализи експлозије. Ове релације служиле би за прелиминарну процену масе експлозива за потребе криминалистичко-техничког/оперативног рада полиције, тужилаштва и суда. Представљен нумерички модел могао би да се користи за процену масе експлозива на основу карактеристика кратера као и за предвиђање карактеристика кратера на основу познатих карактеристика експлозива и подлоге.

У раду је указано и на кривичноправни и кривично-процесни значај утврђивања масе експлозива на основу карактеристика кратера с обзиром да суд у зависности од употребљене масе експлозива може извршити различите квалификације кривичног дела у коме су коришћени ефекти експлозије, а сходно томе и одмерити кривичну санкцију. Тако овај рад може бити и практично применљив од стране форензичких инжењера који се појављују на суду у својству судских вештака.

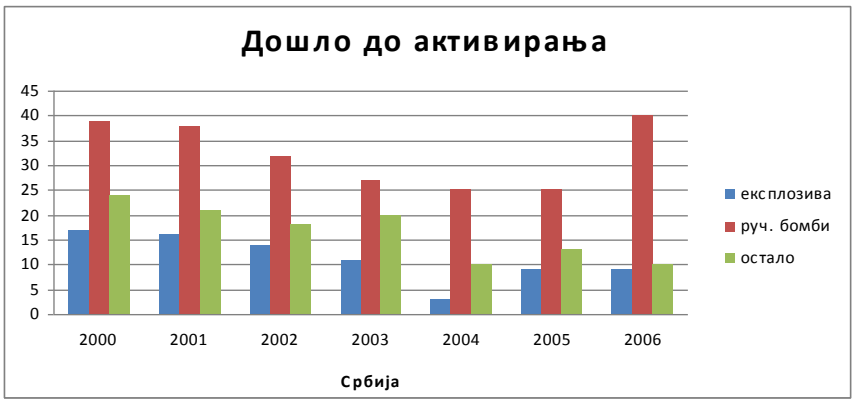
2.4 Практична применљивост и оправданост истраживања исказана кроз број експлозија средстава на територији Републике Србије

Практична применљивост, научна и стручна оправданост истраживања огледају се у проширивању и продубљивању знања о ефектима експлозије на подлогу са којом је експлозивно пуњење у контакту и уграђивање тих сазнања у теоретски фонд науке и у практичну примену у форензичкој анализи експлозија. Ова сазнања би требало да унапреде процес утврђивања узрока експлозије за потребе суда. Унапређење одређивања узрока експлозије на основу карактеристика кратера огледа се у томе што ће се применом одговарајућих математичких зависности чак и на самом месту експлозије моћи проценити маса коришћеног експлозива.

Учестале и намерно изазване експлозије, а које су се последњих деценија дешавале и у Републици Србији, међу грађанима изазивају немир и несигурност. С обзиром на ратно окружење последњих деценија, експлозив и експлозивна средства су грађанима Републике Србије била лако доступна. У сврху анализе оправданости истраживања, као потврда да се на нашим просторима дешавају експлозије (намерно и ненамерно изазване), а код којих треба да се утврди узрок, у Прилогу 1 је дат приказ броја експлозија са последицама на територији Републике Србије и то по полицијским управама током периода од седам година (од 2000. закључно са 2006. годином[4]). Дат је број намерно подметнутих експлозивних средстава (импровизованих направа са бризантним експлозивом као пуњењем, ручних бомби и др.) код којих је дошло и код којих није дошло до активирања као и приказ броја активираних (бацањем и сл.) и нехатно активираних експлозивних средстава са последицама. Такође, дат је приказ последица на људима (смрт, тешке и лаке телесне повреде) подметнутих и нехатно активираних експлозивних средстава као и место где су наведена средства експлодирала (угоститељски објекат, стан-кућа, мост-пруга, улица-парк и др.). Дати су графички прикази броја подметнутих експлозивних средстава на

[4] Извор МУП Републике Србије

територији Републике Србије у периоду од 2000. до 2006. године и то формацијских средстава са бризантним експлозивом као пуњењем – ручних бомби, мина и др. и импровизованих средстава код којих је као пуњење коришћена нека друга експлозивна материја. Посебно, у Прилогу 1 дат је преглед подметнутих експлозивних средстава по полицијским управама градова Републике Србије (Београд, Крагујевац, Јагодина, Ниш, Пирот, Прокупље, Лесковац, Врање, Зајечар, Бор, Смедерево, Пожаревац, Ваљево, Шабац, Краљево, Крушевац, Чачак, Нови Пазар, Ужице, Нови Сад, Сомбор, Суботица, Зрењанин, Кикинда, Панчево и Сремска Митровица). На сликама 1-7 дат је приказ броја подметнутих и активираних експлозивних средстава, подметнутих средстава код којих није дошло до активирања, средстава која су активирана а нису подметнута, приказ места на којима је вршено подметање и активирање средстава, приказ последица подметнутих и активираних средстава, приказ броја и приказ последица нехатно активираних експлозивних средстава по годинама почев од 2000. до 2006. на територији Републике Србије збирно.



Сл.1. Број подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и др.) код којих је дошло до активирања у Србији од 2000. до 2006.



Сл.2. Број подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и др.) код којих није дошло до активирања у Србији од 2000. до 2006.

Анализом броја података, утврђено је да је највише подметнутих ручних бомби активирано 2006. (40), највише експлозивних средстава код којих основно пуњење није бризантни експлозив активирано је 2000. (24), а средстава код којих је основно пуњење бризантни експлозив највише је активирано у 2000. (39). Највише случајева подметнутих средстава са бризантним експлозивом, а код којих није дошло до активирања било је 2000. (5), највише ручних бомби било је 2002. (12), док је осталих подметнутих, а неактивираних средстава било највише 2001. и то (18). На слици 3 приказан је број активираних експлозивних направа а које нису подметнуте већ су активиране бацањем и сл.

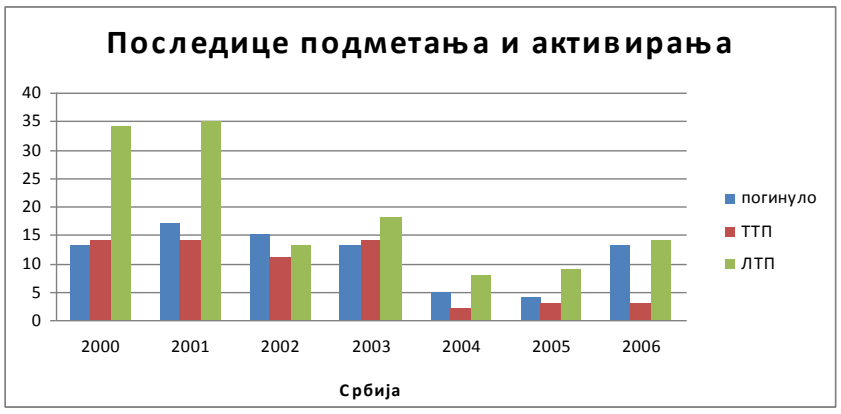


Сл.3. Приказ броја активираних експлозивних средстава (бацањем и сл.) на територији Републике Србије у периоду од 2000. до 2006.



Сл.4. Број активираних средстава сходно месту постављања (угоститељски објекат, отворен простор–улица/парк, стан/кућа, саобраћајница– мост/пруга и др. места) по годинама у РС од 2000. до 2006.

Очигледно је да је највише експлозивних убојних средстава подметано у становима/кућама у 2000. (79), затим на улици/у парку (42) у 2000. и 2002. Највише подметања експлозивних средстава угоститељским објектима било је у 2001. (34), на мостовима/пругама у 2001. (16), а осталих средстава (код којих експлозивно пуњење није бризантни експлозив) у 2000. (34). На територији Републике Србије (без АП Косово и Метохија) највише последица по људски живот ефекти експлозије изазвали су 2001. (17 погинулих, 14 лица са тешким и 35 са лаким телесним повредама), што се види на сл. 5.



Сл.5. Последице изазване подметнутим и активираним експлозивним средствима – број погинулих, лица са тешким и лаким телесним повредама у Србији од 2000. до 2006.



Сл.6. Број експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и др.) код којих је дошло до нехатног активирања на територији Србије од 2000. до 2006.

На слици 6 приказан је број експлозивних средстава која су активирана без умишљаја. Очигледно је да је број нехатно активираних средстава био је највећи у 2001. (7 средстава која за основно пуњење немају бризантни експлозив и 3 ручне бомбе), док је највише средстава са бризантним експлозивом нехатно активирано 2004. и 2006. (по1).



Сл.7. Последице настале нехатно активираним експлозивним средствима – број погинулих, лица са тешким и лаким телесним повредама у Србији од 2000. до 2006.

На слици 7 приказане су последице ефеката ненамерно изазваних експлозија 2000.- 2006. а које су изражене преко броја смртно страдалих лица, броја лица са тешким и лаким телесним повредама. Највећи број смртно страдалих лица (5) био

је 2006., највећи број лица са тешким телесним повредама (7) био је 2001., док је највише лица са лаким телесним повредама било у 2006. години (13).

Када је у питању тренд подметања и активирања експлозивних средстава, примећено је опадање броја подметнутих средстава непосредно после бомбардовања СРЈ да би од 2004. тај број почео поново да расте. Може се закључити да је на територији Републике Србије у посматраном седмогодишњем периоду као експлозивно средство највише коришћена ручна бомба М75, а највише подметнутих и активираних ручних бомби било је 2006. Како ручна бомба има карактеристичну парчад која се разлећу након експлозије (кашика, осигурач, куглице и др. делови кућишта), то су приликом увиђаја препознатљиви трагови експлозије и узрок експлозије углавном није тешко одредити на основу трагова парчадног дејства. Често је код употребе ручне бомбе евидентан опстанак трагова папиларних линија и трагова погодних за ДНК анализу на кашики, а који могу послужити за идентификацију. Кашика обично не претрпи промене у виду пластичних деформација и топљења већ бива само одбачена ударним таласом. Слична је ситуација и код других формацијских убојних средстава с обзиром да је спајањем деформисаних и одбачених делова могуће утврдити врсту направе. Проблем настаје када је експлозивно убојно средство импровизовано и код којих је одређивање узрока експлозије отежано јер делови направе зависе од расположивих средстава, знања и маште извршиоца.

Активирање експлозивних средстава што у намери што из нехата изазива штетне последице, те је значајан сваки допринос у утврђивању узрока експлозије. У циљу потврђивања овог става је и представљен број случајева подметнутих и активираних експлозивних средстава са последицама на територији Републике Србије у наведених седам година. Из представљених дијаграма може се закључити да у посматраних седам година експлозије нису реткост у Србији и да сходно томе завређују посебну пажњу.

Процена масе коришћеног експлозива представља форензички изазов и од изузетног је значаја за давање одговора на нека кривичноправна питања. Наиме, маса експлозива коришћеног у убојном средству је значајан показатељ у поступку дефинисања облика виности (кривице) као обележја кривичног дела и његове

правне квалификације, а у складу са тиме и правилног одмеравања кривичне санкције. (Јовић, 2008:199) За постојање неких кривичних дела потребно је и постојање одређене намере, док кривична дела учињена нехатно не садрже намеру и посебно се нормирају законом. Нормирање виности указује на значај прецизног утврђивања свести и воље извршиоца кривичног дела приликом коришћења експлозивних средстава. Коришћењем експлозивних средстава свест и воља извршиоца кривичног дела могу бити усмерени ка изазивању опасности по одређено лице или објекат, наступању смрти одређеног лица, наношењу повреда, застрашивању и сл. односно уништењу или оштећењу туђе ствари. Зато је приликом утврђивања кривице, између осталог од великог значаја и процена масе коришћеног експлозива. Кривични законик Републике Србије[5] познаје већи број кривичних дела у којима се као радња појављује експлозија, а као предмет или средство извршења кривичног дела експлозивно средство. Тако у кривичним делима против живота и тела ефектима експлозије може се повредити живот и здравље људи (нпр. убиство, тешко убиство, нехатно лишење живота, тешка телесна повреда). Код имовинских кривичних дела која се могу извршити ефектима експлозије може се нанети штета имовини (нпр. тешка крађа, уништење и оштећење туђе ствари, изнуда). У случају кривичних дела против животне средине (незаконит лов, риболов) или кривичних дела против опште сигурности људи и имовине (нпр. изазивање опште опасности) такође може бити коришћен експлозив као и код кривичних дела против безбедности јавног саобраћаја (нпр. угрожавање безбедности ваздушног саобраћаја насиљем). При извршењу тешких кривичних дела против уставног уређења и безбедности Србије (тероризам, диверзија, припремање дела против уставног уређења и безбедности Србије), такође се предузимају општеопасне радње као нпр. изазивање експлозија у намери остварења одређених политичких циљева применом насиља, застрашивања и сл.

Из напред презентованог намеће се закључак да је усавршавање и унапређивање постојећих метода утврђивања узрока експлозије актуелно и корисно.

[5] Кривични законик Републике Србије ("Сл. Гласник РС", бр. 85/2005, 88/2005 – испр., 107/2005 – испр. и 72/2009, 111/2009, 121/2009 и 104/2013)

3. ФОРЕНЗИЧКА АНАЛИЗА МЕСТА ЕКСПЛОЗИЈЕ

Да би се прецизно утврдио узрок експлозије потребно је обезбедити место експлозије, извршити његову форензичку обраду и прикупити адекватне трагове експлозије према одређеној процедури. Након тога треба извршити форензичку анализу прикупљеног материјала.

3.1 Основни појмови о експлозији, дефиниција експлозије

Етимолошко значење појма експлозија потиче од латинске речи *explosio* што значи прасак, пуцањ, распрскавање уз пуцањ. (Вујаклија, 1980) У форензичким речницима термин експлозија обично означава „нагли преображај хемијске енергије у кинетичку енергију уз ослобађање топлоте, светла и и механичког рада“ (Brenner, 2004:105). Неки амерички аутори приликом дефинисања експлозије кажу да „...енергија мора бити ослобођена за довољно кратко време и у довољно малој запремини...” (Baker, et.al., 1983) Експлозије се, према *Lees* могу дефинисати као нагло ослобађање велике количине енергије из релативно мале запремине експлозивне материје у околни простор. (Lees, 1996:5) Термин експлозија односи се на нагло ослобађање топлоте или пораст притиска.[6] Кенедијеви у својој књизи експлозију дефинишу као „гасодинамички феномен који се у идеалним теоретским условима манифестује као сферни талас топлоте и притиска који се шири“. (Kennedy & Kennedy, 1990) Стаматовић дефинише експлозију у ширем смислу речи као „процес врло брзог физичког или хемијског преображаја система (разлагање материје, прелазак загрејане воде у пару, електично пражњење) праћен преласком његове потенцијалне енергије у механички рад“. (Стаматовић, 1996:17) Слична дефиниција може се наћи и у руској литератури. Тако Покровски и Федоров дефинишу експлозију као „сваки довољно брз процес преображаја потенцијалне енергије у кинетичку енергију елементарних честица.“ (Покровский & Федоров, 1957:8) Јарамаз експлозију

[6] Glassman, I. (1977). *Combustion.* Orlando, FL: Academic Press. Цитирано према Martin R., Reza A., Anderson L. What is an explosion? A case history of an investigation for the insurance industry, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 13 (2000) 491–497

дефинише као „процес веома брзог физичког или хемијског преображаја система који је праћен трансформацијом његове потенцијалне енергије у механички рад“ (Jaramaz, 1997).

Проблем у вези са дефинисањем појма експлозије и значају дефинисања појма са аспекта делокруга рада осигуравајућих друштава, а која се често појављују у форензичком ланцу код процене и накнаде штете, уочили су и *Martin, Reza* и *Anderson* осврнувши се на истраживања америчког удружења за анализу лома *Exponent Failure Analysis Associates*. Они износе закључак да се дефиниције термина експлозија у најширем смислу односе на нагло ширење гасова или нагли пораст притиска гасова и ослобађање или трансформацију енергије на насилан начин, која подразумева вршење механичког рада, који у случају хемијских експлозија подразумева и егзотермну хемијску реакцију, одн.ослобађање топлоте. (Martin, et.al., 2000.) Тако се јавила потреба за класификацијом експлозија у којој свој допринос дају и *Abbasi* и *Pasman* разматрајући постојеће класификације према којима се експлозија бризантних експлозива убраја у експлозију кондензоване фазе (*condensed phase explosion*). Они наводе следеће дефиниције експлозије „...ослобађање енергије које проузрокује талас...“, одн. „...брза трансформација потенцијалне енергије у кинетичку укључујући наглу експанзију гасова...“(Abbasi, et.al., 2010) За утврђивање одговорности и одмеравање казне одговорним лицима надлежан је суд док исплата штете оштећеном често иде на терет осигуравајућих друштава. Зато је правилна процена штете веома важна. Штета након експлозије може резултирати бројним факторима као што су: ваздушни удар, стварање кратера у тлу, избацивање тла, сеизмичке вибрације, рушење зграда, термичко дејство ватрене лопте експлозије. (Mohantu, 1998:32) Све горе наведене дефиниције експлозије у основи су сличне, али са аспекта форензике оне се могу проширити ефектима експлозије на окружење с обзиром да штете узроковане експлозијом укључују вишеструко дејство на околину. (Бјеловук, 2005.) Наиме, када експлозивно пуњење детонира на површини подлоге оно се нагло преображава у гасовите продукте реакције који се налазе под високим притиском. Врста експлозива, густина и димензије пуњења одређују којом ће брзином то експлозивно пуњење прећи у гасовито стање. Резултујући

притисак формира ударни талас који разара, оштећује и помера објекте на својој путањи. Када је експлозивно пуњење постављено на бетонску, асфалтну, земљану или неку другу тврду површину долази до стварања ударног таласа који ломи и дроби подлогу у непосредној близини пуњења формирајући кратер. У случају површине тањих зидова формираће се отвор. Уколико је експлозивно пуњење довољно велико продукти експлозије могу створити ударни талас који ће додатно створити и радијалне пукотине у подлози.

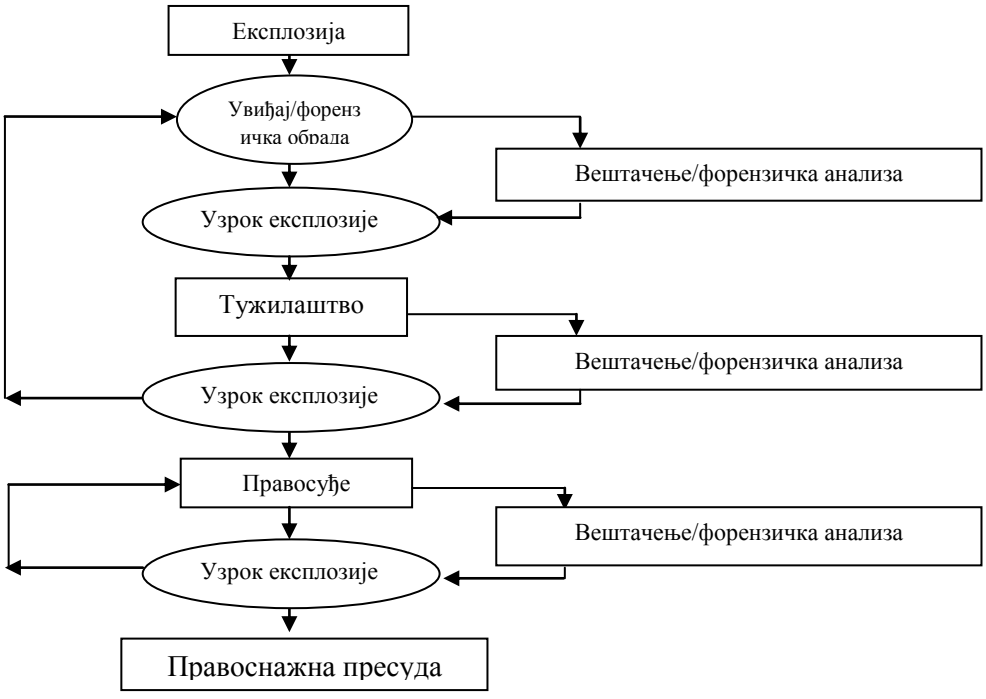
Дакле, са форензичког аспекта експлозија би се могла дефинисати као *веома брз процес преображаја термодинамичког система праћен прелазом његове потенцијалне енергије у кинетичку енергију, топлоту и механички рад, а који у непосредној околини места експлозије оставља трагове разарања, рушења, ломљења, савијања, топљења, паљења и померања објеката, трагове у виду кратера или отвора, трагове услед разлетања и пенетрације парчади, трагове услед сеизмичких ефеката, стварајући притом материјалну штету, рањавања и смртне последице код људи.*

3.2 Форензичка обрада места експлозије

Форензичко инжењерство се, између осталог, бави истраживањем намерних и случајних експлозија. Основна сврха истраживања експлозије, која се спроводи кроз обраду и анализу места експлозије подразумева одређивање три основна елемента: порекло, узрок и одговорност за експлозију. Порекло експлозије обично се односи на место иницијације експлозива. Узрок експлозије је она околност или активност која је довела до експлозије. Основни разлог испитивања узрока и порекла експлозије лежи у утврђивању одговорности за експлозију, сумарном финансијском губитку и утврђивању повређивања и броја фаталних исхода који се могу догодити. Одговорност за експлозију лежи у околности, активности, грешци, намери, а у вези са људским фактором. (Kennedy & Kennedy, 1990:2). У зависности од утврђених чињеница форензичком обрадом и анализом места експлозије, од стране суда биће изречена пресуда и одмерена адекватна кривична санкција извршиоцу кривичног дела при ком је дошло до експлозије.

Испитивање експлозије започиње обрадом места експлозије која подразумева прикупљање материјалних и личних доказа (разни искази). (Алексић, et.al, 2004). Обрада места експлозије је радња која се предузима у оквиру увиђаја, а која је у надлежности суда кад је за утврђивање или разјашњење какве важне чињенице у поступку потребно непосредно опажање (Законик о кривичном поступку). Увиђајем се подразумева комплекс активности које обухватају непосредан преглед материјалних објеката и њихове повезаности са циљем откривања трагова кривичног дела и разјашњења других околности које су од значаја за кривично дело, а од стране лица које води истрагу. (Жарковић, 2005; Жарковић, и др., 2012) Увиђај након експлозије подразумева прикупљање и обраду трагова након догађаја који се шаљу на одговарајућу форензичку анализу (резултат анализе је узрок експлозије) на основу које се формира основана сумња довољна за подношење кривичне пријаве против одговорних за експлозију. За вршење увиђаја одговоран је истражни судија, одн. тужилац који, у складу са важећим Законником о кривичном поступку, може затражити помоћ стручног лица криминалистичко-техничке/форензичке или друге струке. Тако, након експлозије, на лице места излазе и стручњаци (радници криминалистичке и противдиверзионе технике и вештаци/форензички инжењери) да, по налогу суда, изврше увиђај. По доласку на место експлозије, у првом моменту не може се са сигурношћу тврдити о каквој експлозији је реч, тј. да ли је реч о експлозији пара запаљивих течности, запаљивих гасова или експлозивног средства. Одговор на то и сва остала питања у вези са експлозијом даће стручно лице - регистровани судски вештак, који ауторитетом свог знања, вештина и искуства из одређене области даје свој налаз и мишљење у вези са чињеницама које се утврђују у поступку. Он је заправо експертски сведок. (Жарковић, et.al., 2011) Вештачење, као радња доказивања дефинисана је Законником о кривичном поступку РС, а може се предузети када је за утврђивање или оцену неке важне чињенице неопходно прибавити налаз и мишљење лица које располаже потребним стручним знањем. Форензичка обрада и анализа места експлозије може подразумевати ангажовање стручњака из многих области с обзиром на мултидисциплинарност појаве и различите приступе проблему. Тако, на форензичкој анализи експлозије могу радити експерти различитих струка: физико-хемичари (на основу узорака са места експлозије

применом одговарајућих метода анализе дају информацију о врсти коришћеног експлозива), форензичари – инжењери (дају информацију о маси коришћеног експлозива на основу оштећења насталих експлозијом, врсти коришћене експлозивне направе, начину иницирања експлозива, као и о материјалној штети), специјалисти форензичке медицине (дају информације о повредама и евентуалном узроку смрти на жртвама експлозије), форензичари – биолози (дају информацију о евентуалном ДНК профилу), специјалисти дактилоскопије (дају информацију о отисцима прстију извршиоца) и др. експерти. (Митровић & Ступар, 2002;) Уколико је потребно, током поступка могу се захтевати додатне форензичке анализе које понекад изискују и поновни одлазак на место експлозије и његову накнадну обраду. У току поступка може се јавити потреба да се, на основу прикупљеног доказног материјала – увиђајне документације и документације већ извршених вештачења, тражи мишљење неког другог стручњака те суд може захтевати и накнадну форензичку анализу других експерата из области. На овај начин прибављени материјални докази, а у склопу свих осталих доказа бивају разматрани од стране суда и дају основ за изрицање правоснажне пресуде. Дијаграм тока утврђивања узрока експлозије приказан је у виду алгоритма на сл. 8.



Сл. 8. Дијаграм тока утврђивања узрока експлозије

Пре него што је започет процес вршења увиђаја подразумева се да је место експлозије адекватно обезбеђено и уклоњени сви ризици од нових експлозија. Безбедност увиђајне екипе и других присутних на месту догађаја је приоритет. Екипа која прва стиже на место експлозије дефинише границе места експлозије које се могу касније померити уколико увиђајна екипа то сматра целисходним. Након прелиминарног прегледа места експлозије треба направити план претраживања. Да би се квалитетно извршила форензичка обрада места експлозије од виталног је значаја да се у најкраћем року место експлозије „замрзне“ одн. фиксира постојећим методама (вербално одн. фиксирање писањем записника, извештаја и белешки, метод фотографисања и видеоснимања, мерно-графичко фиксирање и фиксирање методом изузимања трагова са лица места и изливање рељефних трагова). (Yallop & Kind, 1980; Липовац и др., 2010). Ради избегавања пропуста, преглед места експлозије не треба обављати насумице већ према неком реду (спирално полазећи од центра експлозије, линијски, у виду концентричних кругова и сл.) јер су трагови најчешће разбацани по широком подручју и као такви тешки за проналажење. Након уочавања предмета и трагова на месту експлозије, они се обележавају и сваком од њих додељује одређена ознака, која тај траг прати у целој увиђајној документацији. Предмети и трагови на месту експлозије се фотографишу по методологији снимања на месту догађаја (полазећи од ширег изгледа лица места до фотографисања детаља – принцип од општег ка посебном) непосредно пре и након обележавања и маркирања као и пре напуштања. Како је приликом израде скице и ситуационог плана места експлозије потребно прецизно нагласити микро и макролокацију, то се као опрема за вршење увиђаја након експлозије може користити и уређај за глобално позиционирање – GPS (*Global Positioning System*). Квалитетна визуелизација места експлозије подразумева израду записника о увиђају као јединог елемента увиђајне документације од кривично-процесног значаја са прилозима у виду скице, ситуационог плана, фотодокументације, видео снимка и извештаја о форензичком прегледу лица места. У конвенционалном приступу мерења примењују се мерне траке различитих дужина, мерни точак и евентуално ручни ласерски даљиномер, видео камере и фотоапарати. Савремени уређаји и опрема пружају могућност стварања 3Д модела места догађаја, приказаног у виртуелној стварности (3Д

скенери и штампачи или примена фотограметрије). Данас је у великој мери из примене потиснута употреба аналогних уређаја за фотографисање и видео снимање (фотоапарата и видео камера) дигиталним уређајима. (Липовац, и др., 2010) Док форензика прибавља материјалне доказе, криминалистичка полиција која ради на расветљавању експлозија прикупља информације од грађана и обезбеђују личне доказе.

Многи трагови-последице експлозије, а који могу послужити за идентификацију узрока експлозије, могу бити расути по великом простору и бити непостојани, док су оштећења сталне природе. О значају оштећења након експлозије говори и *Yallop* „Испитивање оштећења је уобичајена полазна тачка испитивања узрока експлозије" (Yallop & Kind, 1980). Оштећења услед површинске експлозије бризантног експлозивног пуњења могу се јавити у разним видовима механичких оштећења са обавезним карактеристичним трагом – кратером, који представља центар експлозије и место постављања експлозивног средства.

При одређивању центра експлозије велики је значај кратера, који се ствара када се експлозија деси на тлу или непосредно изнад или испод њега. (Покровский, 1980; Szuladzinsky, 2010:663) Центар експлозије и непосредно подручје око њега (приближно $7m$, зависно од масе и врсте експлозива) садржи најзначајније трагове (Корајлић, 2009:144). У првобитном прегледу кратера, трагови експлозије могу садржати значајне информације, одн. карактеристике експлозивног средства. (Baker & Winn, 1998) Кратери могу бити извор фрагмената средства и остатака неизреагованог експлозива.

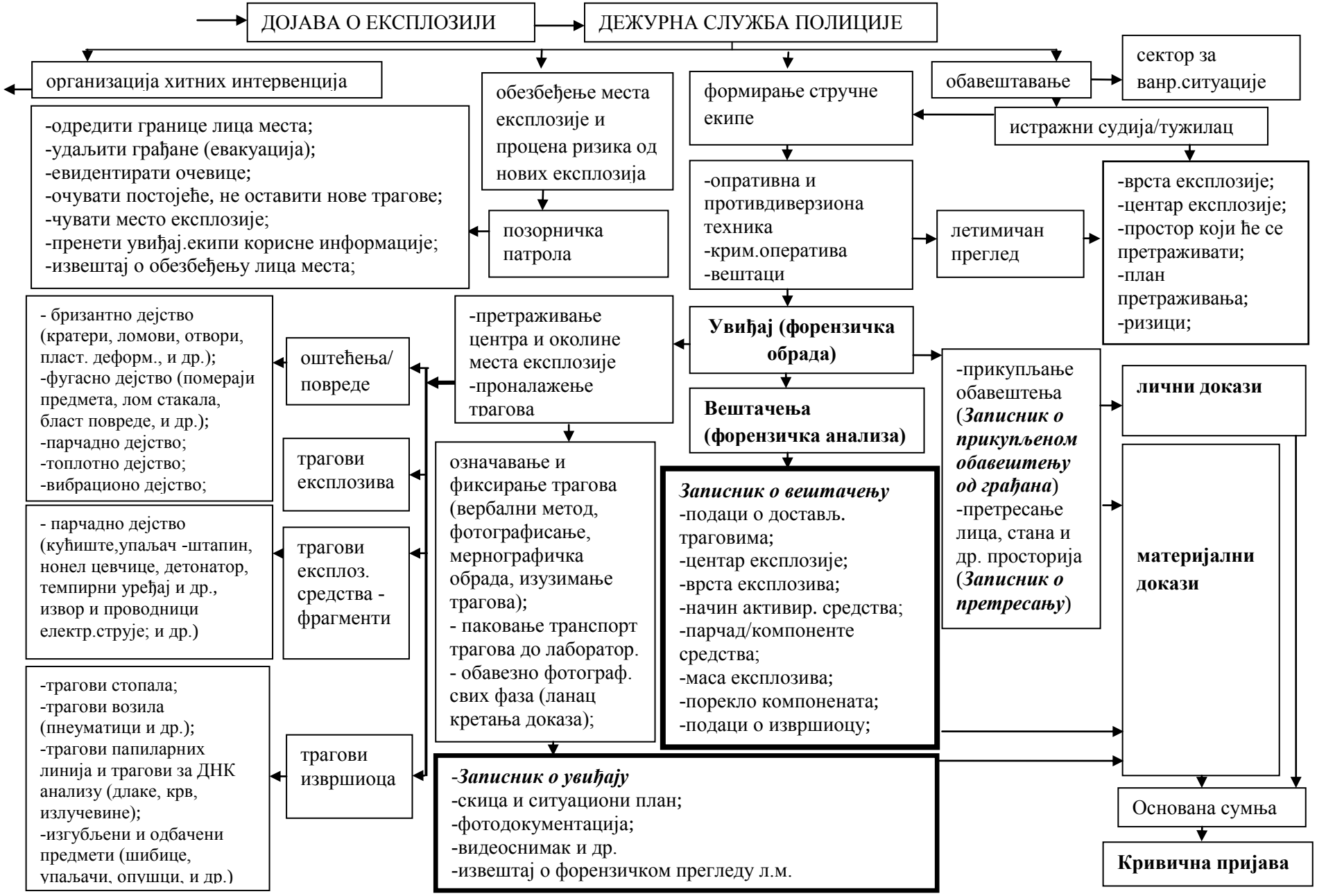
Приликом форензичке обраде места експлозије употреба бризантних експлозива може бити препозната карактеристичним бласт ефектима који се манифестују интензивнијим оштећењима услед притиска у односу на коришћење других експлозивних материја. Ова сила произилази из брзине кретања фронта хемијске реакције кроз неизреаговани експлозив, а која је већа од брзине звука. Карактеристичан начин на који тај притисак делује на непосредну околину је означен као бризантност експлозива (*brisance* or *shattering effect*). (Strobel, 1998) Бризантно дејство експлозивног таласа је доминантно дејство експлозије на

непосредно окружење, нарочито у случају кад експлозивна направа нема кошуљицу (парчадно дејство је минимизирано) што је предмет овог рада. Ударни талас експлозије узрокује размрскавање и дробљење непосредног окружења. Бризантност експлозива је мера његове снаге. Бризантност експлозива је сразмерна брзини разлагања експлозива одн. брзини којом експлозив ослобађа своју енергију.

Препознатљиви проблеми који се јављају приликом обраде места експлозије су:
- ризици од могућности нових експлозија;
- место експлозије садржи остатке експлозивне направе који су разбацани на великом простору, што отежава одређивање зоне места експлозије и проналажење трагова;
- центар експлозије нарочито ако је у питању затворен простор може бити затрпан;
- избор пронађених трагова, а који ће бити анализирани захтева озбиљну селекцију;
- пронађене трагове, због своје специфичности, до форензичке лабораторије треба транспортовати у херметички затвореним кутијама услед испарљивости већине трагова који садрже експлозивну супстанцу;

Ради превазилажења ових проблема потребна је адекватно образовање и обука стручњака за експлозије као и придржавање процедура на месту експлозије. Значај квалитетне обраде и анализе места експлозије је у започињању ланца кретања доказа, где сваки доказ мора задовољити одређене стандарде да би био прихваћен од стране суда. Од изузетног је значаја постојање јасне и прецизне процедуре у поступању са материјалним доказима, од момента уочавања трагова на месту догађаја до њихове презентације на суду. То се постиже сведочењем свих особа које су поседовале доказ о томе да доказ није покварен, замењен или контаминиран односно фотографисањем у свим фазама кретања доказа. Ланац кретања доказа подразумева праћење кретања материјалног доказа од момента његовог проналажења на месту догађаја преко фиксирања стандардним методама, паковања и транспорта па све до изласка из лабораторије и презентовање резултата анализе на суду. У домаћој форензичкој пракси ланцу кретања доказа

није поклоњена потребна пажња па се дешава да многи докази на суду бивају оспоравани. Међународни стандард ISO 17020, а под који би требало подвести поступање на месту догађаја уопште, подразумева примену стандардних оперативних процедура и које тек треба да се разраде у домаћој форензичкој пракси. Циљ стандардизације поступања са материјалним доказима је међународно признање доказа на суду. (Милошевић et al., 2009; Žарковић et al., 2010) Стандардизација поступања са материјалним доказима у случају експлозије подразумевала би најпре безбедан приступ месту експлозије, квалитетно обезбеђење места догађаја без нарушавања изгледа места експлозије и остављања нових трагова, форензичку обраду места експлозије према процедурама – од прегледа лица места и проналажења трагова, уз употребу савремених светлосних уређаја и детектора, означавања трагова, фотографисања места експлозије и то најпре шири и ужи изглед места експлозије, а затим и фотографисање делова лица места и трагова као детаља уз употребу тзв. размерника, мерно-графичке обраде места експлозије која резултује израдом скице и ситуационог плана, израду записника о увиђају, до паковања трагова у адекватну амбалажу са обавезном ознаком која прати траг. Поступак паковања и транспорта трага до лабораторије обавезно треба фотографисати, као и поступак отварања амбалаже непосредно пре анализе у форензичкој лабораторији, што иде у прилог ланцу кретања доказа. Овим фотографијама али и сведочењем свих који су били у контакту са трагом осигуран је форензички ланац а тиме и осујећен сваки покушај оспоравања доказа на суду. На слици 9. приказан је предлог организационе шеме обезбеђења места експлозије, вршења форензичке обраде и анализе одн. поступка прибављања материјалних доказа у случају експлозије. Очекује се да предложена шема поступања на месту експлозије допринесе ланцу кретања доказа као евентуална стандардна процедура поступања са материјалним доказима, што би спречило одбацивање доказа на суду као неадекватних.



Сл. 9. Организациона шема обезбеђења места експлозије, вршења увиђаја (форензичке обраде места експлозије), вештачења (форензичке анализе трагова експлозије) и поступка прибављања материјалних доказа

У којој мери ће обрада места експлозије бити квалитетно извршена зависи од: нивоа обучености и стручности чланова увиђајне екипе (различити профили стручњака), метеоролошких услова, квалитета обезбеђења места експлозије, али и од опреме којом увиђајна екипа располаже (савременост, квалитет, подобност и сл.). Како у домаћој пракси има много нерасветљених кривичних дела и догађаја код којих су коришћена експлозивна средства, као и много пропуста, то се јавља потреба за унапређење послова обраде места експлозије. Најчешће грешке при обради места експлозије чине се због људског фактора – незнање, немар и др. пропусти. У домаћој форензичкој пракси вештаци – форензичари инжењери не одлазе увек на место експлозије, тако да се дешава да у лабораторију бивају донешени неадекватни узорци за анализу и одређивање врсте експлозива, те се не може утврдити који је експлозив коришћен за израду средства, а самим тим се не може поуздано утврдити ни маса експлозива. Такође, дешава се да вештаку буду достављене неадекватне димензије кратера и долази до великих одступања при процени масе експлозива. Постоји потреба да се укаже на ове пропусте у домаћој пракси. Форензички инжењери су највећи познаваоци форензичке обраде и анализе места експлозије, те је њихово ангажовање на месту експлозије и то одмах по сазнању за експлозију веома пожељно.

Стандардна опрема за обраду места експлозије обухвата универзални несесер за увиђаје, несесере са опремом за обележавање и маркирање трагова, за осветљавање лица места у ноћним условима, за проналажење латентних трагова, фотоопремом, опремом за мернографичку обраду места догађаја и позиционирање у простору, за дактилоскопирање лица на терену, за изазивање латентних трагова папиларних линија, за фиксирање рељефних трагова, за изузимање трагова стопала електростатичком методом, усисивач за микротрагове, брисеви за ДНК узорковање и др. опрема[7]. Најпрактичније је да комплет опреме за форензичку обраду лица места буде смештен у специјално комби возило што и јесте пракса у многим државама.

У досадашњој форензичкој пракси обраде места експлозије није се примењивао тродимензионални (3Д) ласерски скенер, а који се појавио почетком овог века. С обзиром на карактеристике које поседују савремени скенери, помоћу овог уређаја

[7] О детаљима у вези са опремом за вршење увиђаја видети опширније на сајтовима: www.bvda.com доступан 14.02.2012., www.projectina.ch доступан 14.02.2012., http://www.sirchie.com/ доступан 14.02.2012., http://www.dojes.com/ 14.02.2012. као и у каталозима форензичке опреме других произвођача

могуће је снимити читав низ детаља на лицу места. Снимци израђени на овај начин могу се користити за анализу трагова експлозије, конкретно кратера. Постоје две врсте 3Д скенера који би се могли користити у криминалистичко-форензичкој обради места експлозије: за панорамско скенирање већих простора и ручни 3Д скенер. Последње генерације 3Д скенера имају интегрисану фото/видео јединицу и омогућавају снимање током скенирања, и тиме прикупљају податке и о текстурама скенираних површина. Крајњи производ скенирања је 3Д модел са реалистичном структуром скенираних површина и могућношћу да се прецизно измери било која дужина на обрађеном месту догађаја[8]. Овакав модел може се посматрати из више углова и могуће је изнети многе закључке значајне са аспекта форензике. Сем конвенционалним методама кратери су до сада мерени на више начина.

Могућност мерења кратера насталих ударом великим брзинама кохерентним радаром описана је у раду (Kay, et.al., 1997). Аутори су описали примену интерферометријске технике у мапирању кратера - последица удара у лабораторијским условима. Они су дошли на идеју о примени кохерентног радара јер су уочили да метод мерења максималне дубине, централне дубине и главног пречника у случајевима удара сферног тела о неку подлогу не даје прецизне податке о профилу уздужног пресека кратера. Примена кохерентног радара подразумева бесконтактну методу која се користи за топографска мерења грубих површина. Дигитална технологија даје много веће могућности и много је једноставнија за примену од оптичких.

Преглед примене дигиталне фотограметрије, ласерске технике и класичног начина у мерењу кратера након експлозије са предностима и недостацима сваког појединачно дала је *Lenox*. Она је направила упоредну анализу примене конвенционалног начина мерења кратера након експлозије (мерном траком), ласерским системом за мерење *Cavity Monitoring System* фирме *Optech* и аустријским *3G ShapeMetriX3D* системом који се базира на примени фотограметрије. Иако сва три примењивана система имају своје предности и недостатке, она истиче да је за појединачне случајеве ефикасан конвенционални метод, али није прецизан уколико се жели профил кратера. Ласерски систем није практичан јер захтева много времена и нема задовољавајућу прецизност. Кад је у питању захтевано време и прецизност, она даје предност примени

[8] Опширније о 3Д скенерима може се видети на следећим сајтовима: http://www.zcorp.com/documents/588_3D%20Scanning%20to20Go%20eBook%20FINAL.pdf доступан 13.8.2011. год, http://www.3gsm.at/downloads/JMX_PanoramaScanner_en2.pdf, доступан 02.02.2012. и др.

фотограметрије, која подразумева фотографисање дигиталном камером са претходно постављеним маркерима. (Lenox, 2003) Овај став је формиран без улажења у анализу цене коштања примене наведених метода, као ни примену у различитим временским условима која су у случајевима форензичке обраде од изузетног значаја. Наиме, када се догоди кривично дело у којем се као траг експлозије јавља кратер, неопходно је да се одмах почне са обрадом, без обзира на временске услове у којима се ради увиђај.

За прецизну процену масе коришћеног експлозива потребан је прецизан податак о димензијама одн. запремини кратера. Досадашња криминалистичко-форензичка пракса Републике Србије подразумевала је израчунавање запремине кратера апроксимацијом кратера купом са основом у облику круга или елипсе. Ова метода подразумева мерење димензија кратера конвенционалним инструментима. Овај начин добијања податка о запремини кратера није увек прецизан и не даје профил кратера, али овај метод може бити иновиран употребом постојећих дигиталних технологија на тржишту. У пракси увиђаја саобраћајних незгода и криминалистичко-техничкој пракси Републике Србије било је покушаја да се уведе фотограметрија као стандардна метода. Фотограметрија налази примену и у рударском инжењерству при снимању стенског масива пре рушења. Ова технологија подразумева примену дигиталне фотографске камере у снимању места догађаја и употребу маркера постављених на одређеном растојању. Након снимања, слика се уноси у одговарајући софтвер који, на основу тог растојања и правила централне пројекције одређује растојања између жељених тачака[9].

Како се у досадашњој форензичкој пракси обраде места експлозије и мерења кратера није примењивао 3Д скенер, у овом раду биће дат покушај увођења ове врсте технологије у обради места догађаја када су у питању експлозије са кратером. Тако је, у циљу испитивања могућности примене 3Д скенера у форензичкој пракси у овом раду извршено снимање једног кратера 3Д скенером и упоређене су вредности запремина кратера на три начина (конвенционално мерење, израда одливка и 3Д скенирање). Очекивани резултат у експерименталном делу је да је најпрецизнији и најпрактичнији начин добијања запремине кратера 3Д скенером док се очекује да апроксимација кратера купом да највеће одступање. За потребе овог истраживања изнајмљен је 3Д скенер са припадајућом опремом и компјутерским програмима (софтвери *ZScan* и *Geomagic*) како би се испитала могућност и ефикасност његове примене у форензици.

[9] Детаљније о овом систему видети на: http://www.3gsm.at , доступно 31.01.2012.

Како је експлозија егзотерман процес, кратер се може снимити инфрацрвеном камером након експлозије. Термално снимање подразумева снимање у циљу детекције енергије у области невидљивог дела спектра електромагнетног зрачења и конвертовање детектоване енергије у видљиву слику. У основи, термална фотографија показује снимљену зону базирану на разликама у температури. (Thurman, 2006) Са аспекта одређивања вредности запремине кратера на подлогама од земље, асфалта, бетона, дејство топлоте ослобођене експлозијом нема битан утицај (подлога је постојана на високим температурама и неће настати нови трагови у подлози). Термална камера би се могла примењивати у обради места експлозије за одређивање времена експлозије на основу брзине хлађења кратера, као и центра експлозије, што би могло бити правац неког будућег истраживања.

3.3 Форензичка анализа трагова експлозије

Из напред наведеног очигледно је да форензичка обрада и анализа експлозије није једноставан задатак и да представља својеврсно истраживање тако да форензичар мора бити специјално обучен. Та врста посла се не може радити као нека споредна активност полицајаца, општих форензичара, хемичара, војних инжењера и сл. Истражитељ експлозија мора имати адекватно академско образовање са широким знањима о експлозивима и поступку форензичке обраде и анализе експлозија. Такође, он мора имати практична искуства о руковању експлозивима и приступ лабораторији као и способност да пренесе своје знање и закључке, до којих је дошао истраживањем, правним субјектима (адвокату, судији, тужиоцу и др.) користећи језик свима разумљив (без претеране употребе стручних термина). Он мора бити упознат у извесној мери и са правном регулативом у вези са деликтима где се појављују експлозиви као предмет или средство извршења кривичног дела. Да би се форензичар-инжењер одазвао на позив за вршење увиђаја он мора имати практична сазнања из више различитих области. Најпре је реч о његовом законском основу боравка на месту експлозије, затим и способности процене инцидента (да ли је уопште дошло до експлозије, постоји ли опасност од нових експлозија), способност проналажења и фиксирања трагова у оквиру фиксирања затеченог стања на месту експлозије који би омогућили идентификацију експлозивног средства, начине иницирања и резултате активирања. Форензичар мора започети свој посао од компоненти експлозивне направе и ефеката експлозије, што је супротно од

послова којима се баве минери и војна индустрија (полазе од ефеката експлозивног средства на циљу и конструишу ново или користе постојеће експлозивно средство). Он мора бити спреман да формира верзије о томе шта се и на који начин догодило на месту експлозије. Он прави одговарајући научни модел решавања проблема, са систематским приступом. Форензичар препознаје и формулише проблем (одредити узрок експлозије), прикупља податке кроз посматрање и преглед места експлозије, формулише и тестира хипотезу. Кроз мисаону реконструкцију догађаја он поставља хипотезу шта се догодило и по потреби је модификује на основу прикупљених информација. Постављена хипотеза се тестира кроз предвиђање присуства материјалних доказа који можда нису одмах били очигледни или су се превидели првобитним прегледом места експлозије. На крају се форензичком анализом потврди крајња хипотеза и одреди узрок експлозије у конкретном случају.

По дефиницији, стручњак је особа која је, кроз своје образовање или искуство развила знање или вештину у одређеној области тако да може формирати мишљење које ће помоћи у тражењу истине. Стручњак се традиционално појављује да својим сведочењем, а коришћењем свог техничког, научног или другог специјализованог знања пружи помоћ суду да дође до истине кроз разумевање датих закључака јер је област из које се сведочи ван опсега уобичајених људских искустава. Тако „стручњак за експлозије“ – форензички инжењер поседује специјализована знања, обуку и искуство у одређивању узрока, порекла и одговорности за експлозије.

Форензичка пракса је показала да формално образовање вештака није услов – многи стручњаци за експлозије имају мало или нимало формалног образовања у области експлозије. „Њихова експертиза се базира на многим годинама искуства које подразумевају рад на стотинама па и хиљадама случајева“. (Kennedy & Kennedy, 1990:363) Тако се и у домаћој форензичкој пракси као стручњаци за експлозије појављују инжењери разних профила (инжењери машинства, електротехнике, технологије и металургије, рударства, војни инжењери и сл. али и стручњаци других профила (менаџери, официри и сл.). Из тог разлога је ради усавршавања неопходно да стручњаци за експлозије похађају основну обуку из форензике и низ семинара уз непрестан рад на разним реалним случајевима и обавезним менторством старијих и искуснијих колега.

Када стручњак за експлозије обави тражено истраживање, о томе саставља писмени извештај – тзв. Записник о вештачењу, а који се састоји од *Увода* (ко је наручио вештачење, која су питања постављена вештаку, опис предмета или трага достављеног на вештачење и сл.), *Налаза* (описују се методи и опрема који су примењени у истраживању, као и добијени резултати) и *Мишљења* у ком вештак одговара на постављена питања. (Митровић & Ступар, 2002:277) Експерт мора дати брзу процену сваког лица места у светлу свог знања и искуства. Тако, форензички инжењер - стручњак за експлозије мора поставити минималне стандарде за доказивање и потврду свог мишљења. Мишљење вештака, без обзира да ли се у случају експлозије изјашњава о врсти направе, начину иницирања, врсти експлозива, маси експлозива и сл. може бити дато пред судом у виду категоричке или вероватне тврдње. Категоричка тврдња подразумева исказ вештака у коме је он 100% сигуран у тачност свог налаза, док се под вероватном тврдњом сматра да вештак износи само претпоставку у вези са предметом вештачења. Према Симоновићу «задатак експерта је давање категоричког суда који не допушта никакву сумњу у закључак». (Симоновић, 2004)

Правнике интересује вероватноћа оцене доказа коришћењем субјективне вероватноће, посебно вероватноћа у вези са кредибилитетом сведока и закључци који се могу извести из њихових сведочења. (Garbolino & Taroni, 2002) Како често вештак није у могућности да своје мишљење да у виду категоричке тврдње, то је пред судом тежак и одговоран задатак вредновања таквог мишљења као доказа.

Према Кенедијевима постоје четири нивоа за исказивање мишљења вештака и то: разуман степен научне/инжењерске сигурности; вероватно тачно; могуће тачно и највероватније тачно. (Kennedy & Kennedy, 1990) У Шведској, а према препоруци Европске Асоцијације Форензичких Института - ENFSI се за приказивање резултата вештачења користи скала од девет нивоа којом се вештак изјашњава колико је сигуран у свој налаз, односно колико је потврђена његова хипотеза коју је поставио на почетку испитивања. Наиме, када вештак на крају Записника каже да је сигуран (+4) то подразумева да је вештак 100% сигуран у свој налаз, (+3) означава да је готово сигуран у свој налаз, (+2) да тврди, (+1) да тврди «у извесној мери», (0) означава да су резултати испитивања неубедљиви односно да се не може изјаснити, (-1) означава да «у извесној мери» је одговор на постављено питање негативан, (-2) да тврди да ... није, (-3) означава да је готово сигуран да је одговор на постављено питање негативан и (-4)

да је 100% сигуран да је одговор на постављено питање у Уводу негативан.[10] Форензичари се често ослањају на нумеричке податке у прорачуну вероватноће процене вредности научних доказа и наглашавају недостатак релевантних нумеричких података. Наиме, у многим областима форензичке науке израчунавање вероватноће поузданости доказа је веома тешко с обзиром да живимо у несавршеном свету. (Davis et.al, 1997). Теорија вероватноће налази примену у интерпретацији резултата форензичке анализе и то Бајесова теорема. (Симоновић, 1995; Taroni et.al., 2006.)

Ради давања што прецизнијих резултата форензичке анализе потребно је да форензички инжењер има адекватне трагове са места експлозије прописно обрађене и достављене као и квалитетну увиђајну документацију. Трагови који се изузму са места експлозије пакују се у адекватну амбалажу и транспортују ради форезичке анализе у научној одн. лабораторији форензичког инжењерства. (Kennedy & Kennedy, 1990:5)

Почеци истраживања о ефектима експлозије на окружење започињу још са Хопкинсоном почетком 20. века. Његова искуства довела су до открића „закона скалирања“ (*explosive scaling law*), а који је још увек основни део анализе ефеката експлозије на структуре. (Bulson, 1997) *Hargather* и *Settles* су такође испитивали могућност скалирања деформација различитих материјала услед оптерећења експлозијом. (Hargather & Settles, 2009). Потенцијална енергија хемијског експлозива се за време детонације расподељује у виду неколико различитих форми у времену и простору: таласна енергија, заостала енергија одн. енергетски губици продуката експлозије, потенцијална и кинетичка енергија парчади експлозивне направе и енергија радијације (Mohantu, 1998:15). Хемијска реакција разлагања експлозива траје 10^{-6}-10^{-8}*s*, при чему се ствара висока температура и притисак неколико хиљада пута већи од атмосферског. За хемијске експлозије, скоро 100% ослобођене енергије се претвара у енергију ударног таласа. Код војних бризантних експлозива при детонацији ударни талас има доминантан утицај на стварање оштећења (Ficket & Davis, 1979). Експлозије бризантних експлозива стварају огромне силе притиска и као такве узрокују велика померања масивних предмета на путу ударног таласа, деформације и ломове околних објеката. Главни узрок лома услед експлозије је у створеном ударном таласу при реакцији експлозивног разлагања пуњења када се створи велика количина гасовитих продуката реакције у кратком временском интервалу. Ударни талас се нагло шири од

[10] *Statens kriminaltekniska laboratorium* (SKL), Linköping, Sweden

центра експлозије радијално у свим правцима. Таласни фронт путује кроз околну средину и он садржи већину ослобођене енергије експлозије и то је експлозивни талас. (Henrych, 1979). Надземне експлозије могу бити на нултој „дубини укопавања“ (тзв.”*height of burst*”) где је центар експлозивног пуњења на површини подлоге или изнад. Када је такво пуњење иницирано, ударни талас се креће ка подлози. Овај удар размрскава тло и убацује гасовите продукте детонације у њега. Ширење ових гасова избацује већину материјала тла у ваздух (*ejecta*). Подлога, сабијена и пластично деформисана, трпи талас разређења који улази у компримовану зону, са парцијалном брзином обрнутог смера и разбацивањем више материјала подлоге уназад. Нешто од разбацаног материјала се враћа назад у рупу остављајући за собом кратер. Парчад подлоге која је пала назад у рупу чини слој који је улегнут у односу на горње зидове и обод кратера. (Cooper, 1996:421). При површинској експлозији бризантног експлозива на тлу доћи ће до стварања кратера зато што се тло не понаша као идеална подлога. У стручној литратури може се наћи да, у случају површинске експлозије на идеалној подлози експлозија полусферног пуњења даје исти ефекат на ваздух у окружењу као сферно пуњење истог пречника окачено у ваздуху.

Стварна површина земљане подлоге може се понекад чинити као „идеални рефлектор“ али у многим реалним ситуацијама површинска експлозија оставља кратер, који је у вези са енергетским расипањем. (Szuladzinsky, 2010:560) Стварање кратера површинском експлозијом у вези је са укупном термохемијском енергијом коју експлозив приликом свог разлагања предаје окружењу што подразумева: детонацију експлозивног пуњења, формирање ударног таласа у окружењу, процес сабијања, ерозије, распадања и формирања пукотина одн. дробљење радне средине, одбијање ударног таласа, убрзање гасова и избацивање материјала подлоге продуктима експлозије. (Moraski & Teal, 1965; Петровић, 2001) Експлозија на површини земље се може моделирати тако да се може сматрати као експлозија у ваздуху са 1,8 пута већом укупном енергијом. (Smith & Hetherington, 1994) Одмах након експлозије гасовити продукти реакције продиру у подлогу услед притиска којем су изложени, те се након пружања отпора подлоге одбијају што може створити ударни талас који продире у експлозивни талас. Створени компресиони талас ствара обод кратера. Наиме, извор механичке енергије ослобођене експлозијом обезбеђује компресиони ударни талас који по својој природи узрокује нагли дисконтинуитет у физичким карактерикама подлоге и окружења. Експлозијом се стварају врели гасови (продукти хемијске реакције

разлагања експлозива, загрејан ваздух и гасови настали испаравањем подлоге) који су под притиском и шире се адијабатски. Ударни талас на подлогу и околину делује сабијањем, тј. висок притисак и дисконтинуитет у притиску нагло деформишу непосредно окружење експлозивног пуњења.

У случајевима површинских експлозија велике количине енергије бивају апсорбоване од стране подлоге и веома их је тешко одредити. (Omang et.al., 2009) Услед расипања енергије, а које је условљено експанзијом ударног таласа и механичког рада који се врши на околину, ниво вредности напона на ударном таласу опада испод вредности неопходне за хидродинамичко понашање подлоге. На овом нивоу напона вредност затезне чврстоће подлоге је превазиђена и подлога се руши. Ово је почетак дешавања у зони лома. Затезна чврстоћа подлоге је у функцији молекулских веза и не зависи од гравитације. У пластичној и еластичној зони померај честица је занемарљив, те је допринос дешавања у овим зонама на стварање кратера неважан у односу на дешавања у зони лома и зони у којој се избачене честице подлоге враћају назад. Процес ерозије је проузрокован турбуленцијом гасова како се они шире од центра експлозије. Током овог процеса гасови се крећу спорије од ударног таласа и уклањају материјал подлоге из шупљине кратера гурајући га навише и преко ивица кратера формирајући обод. Ерозија је мањег значаја у процесу стварања кратера али не и неважна. Распаднуте честице подлоге имају брзину кретања која зависи од предате енергије (независно од гравитације, посматрано према *Rankine-Hugoniot* релацијама). Неке од честица подлоге бивају избачене ван кратера, а оне које имају малу почетну брзину падају назад у кратер. Гасовити продукти реакције експлозије делују на честице ваздуха у окружењу.
Да би се дошло до податка о маси коришћеног експлозива потребно је познавати врсту коришћеног експлозива. Тај део истраживања узрока експлозије поверен је форензичарима хемијске струке који, кроз одговарајуће инструменталне методе анализе испитују узорке експлозива са дна и обода кратера. Узорци експлозива се ретко могу видети голим оком, у најбољем случају могуће је наћи загарављена места или треба претпоставити који су делови били у директном контакту са експлозивом и одатле вршити узорковање. Експлозив је по својој природи испарљива супстанца. Уколико је од тренутка постављања до тренутка експлозије прошло довољно времена да се догоди дифундирање молекула пара експлозива у подлогу, онда је детекција експлозива у кратеру на подлози могућа. Проблем се јавља када је коришћено стандардно експлозивно пуњење паковано у ПВЦ амбалажи, када је испаравање

експлозива готово онемогућено. Узорци експлозива се могу испитивати и од стране лица који нису хемијске струке, а на самом месту експлозије кроз прелиминарне „спот тест“ реакције. Те реакције се заснивају на промени боје самог узорка. Предност ове методе је у брзој информацији о врсти коришћеног експлозива, за разлику од инструменталних метода које се раде у акредитованим форензичким лабораторијама, за чије се резултате дуго чека. Резултати брзих анализа на самом месту експлозије веома су корисни за оперативни рад полиције и углавном не представљају доказ на суду. Добро обучени техничари – форензичари за увиђаје могу узети адекватне узорке са места експлозије који могу бити лабораторијски анализирани у циљу утврђивања врсте експлозива. Овим се избегава и боравак великог броја људи на месту експлозије. Велики број људи на месту експлозије компликује ланац кретања доказа и носи ризик контаминације и уништавања трагова. Узорци експлозива се обично узимају кашичицом са дна и обода кратера или одговарајућим брисевима. За форензичку хемијску анализу експлозива из узорака узетих из кратера, а на основу унапред формираних стандарда, користе се инструменталне аналитичке методе анализе и то како хроматографске тако и спектроскопске. Од хроматографских метода анализе, а које служе за раздвајање компоненти из смеша, најчешће су у примени танкослојна хроматографија (*Thin Layer Chomatography-TLC*)[11] и гасна хроматографија (*Gas Chomatography-GC*)[12]. Танкослојна хроматографија се као најједноставнија најчешће примењује у форензичкој пракси. Од спектроскопских анализа примењују масена спектрометрија (*Mass Spectrometry - MS*)[13] инфрацрвена спектрофотометрија (*Infrared*

[11] Ова метода подразумева технику раздвајања компоненти из смеша помоћу плоче на коју су, у физички одвојеним тракама, нанети спорни узорци и неспорни узорак експлозива – стандард. Плоча се ставља у комору за танкослојну хроматографију на чијем дну се налази одговарајући развијач. Комора има и поклопац. Капиларном елевацијом развијач се пење уз плочу, прелази преко нанесеног узорка и носи га. Висине које достигну поједине компоненте смеше су референтне вредности које се посматрају.

[12] Испитивани узорак бива ношен кроз цев - тзв. колону помоћу инертног гаса. Време које испитивана супстанца проведе у колони у директној је вези са њеном структуром. У форензичкој пракси, за идентификацију експлозива ова метода се избегава јер су многе врсте експлозива термички нестабилне.

[13]Масена спектрометрија, као једна од најосетљивијих метода анализе, сматра се једном од најефикаснијих метода које се користе у форензици. Заснива се на јонизацији једињења, које се касније распада на неутралне и наелектрисане елементе (јоне). Идентификација супстанце врши се на основу карактеристичних масених спектара (зависност концентрације насталих јона од количника масе и наелектрисања) за испитивано једињење. Позитиван исход поређења масеног спектра испитиваног узорка са масеним спектрима из електронске базе података подразумева хемијску идентификацију испитиваног узорка. Постоји могућност директног повезивања масеног спектрометра са гасним или течним хроматографима које омогућавају директну анализу сложених смеша без претходног раздвајања. Комбинацијом гасне хроматографије и масене спектрометрије (GC/MS) може се хемијски идентификовати експлозив.

Spectrometry - IR)[14] и др. Спектрометријске методе се заснивају на интеракцији органских молекула са електромагнетним зрачењем из различитих делова спектра електромагнетног зрачења – ултраљубичасто, инфрацрвено и др. Суштина наведених метода је у поређењу референтних снимљених спектара, референтних вредности *Rf* (пређени пут спорног узорка на плочи танкослојне хроматографије), снимљених хроматограма, апсорпционих трака и др. спорних и неспорних узорака (стандарда). За стандард се поставља познати експлозив и пореди се непознати узорак са стандардом. (Максимовић, et.al.,1998) У данашње време поређење ради рачунар, који је повезан са инструментом за хемијску анализу, са обимном базом података у којој су смештени спектри различитих супстанци у електронском облику, а који служе као стандарди за поређење. Резултат поређења се добије веома брзо.

Форензичари инжењери, познаваоци формацијских експлозивних средстава анализом парчади експлодираног средства врше реконструкцију његовог првобитног изгледа и изјашњавају се о врсти средства. Јасно је да је реконструкција непознатог средства лакша уколико је већи број пронађених парчади. Такође, форензичар инжењер се изјашњава и о начину иницирања (да ли је у питању штапинско или електрично иницирање, темпирни упаљачки механизам, механички упаљач, хемијски упаљач, упаљач са даљинским активирањем телекомандни и сл.).

У овом раду реч је о кратеру - карактеристичном трагу, последици експлозије пуњења, који настаје на месту контакта експлозивног средства и подлоге (земља, бетон и асфалт), а не услед удара неког фрагмента средства након разлетања.

3.4 Кратер као траг експлозије

Кратер настаје као последица бризантног дејства експлозије на непосредну околину. Наиме, дејство експлозије на околину одређено је количином кретања која се предаје честицама околине као резултат удара продуката детонације. (Jaramaz, 1997:174) Приликом експлозије на површини тла или непосредно изнад површине тла ослобађањем хемијске енергије експлозива и њеном трансформацијом у кинетичку енергију молекула гасовитих продуката реакције разлагања, ствара се талас

[14] Изглед снимљеног спектра - криве интензитета апсорпције у функцији од таласне дужине или фреквенције зависи од структуре испитиваног једињења. Ова метода се посебно користи у идентификацији непознатих експлозива, а на основу карактеристика апсорпционих трака. Метода се базира на карактеристичној фреквенцији вибрације појединих молекула неке супстанце.

надпритиска који компримује околни простор. Ударни талас се шири и кроз ваздух и кроз тло. (Bjelovuk, et.al., 2012)

Да би се уопште разматрао процес стварања кратера, неопходно је прво дефинисати терминологију у вези са кратрима. Иванов је приметио да постоје извесне конфузије међу истраживачима када су у питању дефиниције и термини у стварању кратера што би подразумевало дефинисање границе кратера и природне структуре као и шта се подразумева под величином кратера. (Ivanov, 2003)

Реч кратер потиче од грчке речи кратер – пехар, врч 1. левкасти отвор на врху вулкана, вулканско гротло; 2. дубока рупа у тлу која настаје после експлозије бомбе, пада метеорита и сл. (Клајн & Шипка, 2007:668) Традиционално, у руском језику постоје два термина, *воронка* који се преводи са левак; рупа, јама (од гранате, бомбе), кратер и *кратер,* који се преводи са кратер, а који се односе на случајеве експлозија хемијских експлозива и нуклеарних експлозија, као и судара насталих великим брзинама. (Станковић, 1998:96) Енглески језик је усвојио један термин, *crater* са значењем уста вулкана; шупљина облика чиније посебно она створена експлозијом[15].

Кратери се могу формирати детонацијом експлозива или ударом великим брзинама у подлогу. У овом раду разматрани су само кратери настали експлозијом. Наиме, бризантни експлозиви у контакту са подлогом избацују део подлоге и стварају седиште експлозије за разлику од иницирајућих експлозива. Војни бризантни експлозиви, као што су тротил, пентрит и хексоген остављају видљив траг у виду зацрњења у седишту експлозије што говори о присуству угљеника у продуктима разлагања услед садржаја органских компоненти и њиховом негативном билансу кисеоника, што није случај код привредних експлозива. (Strobel, 1998:110) Када експлозивно пуњење у контакту са тлом детонира формира се кратер и то од стране ударног таласа усмереног ка тлу који ломи материјал тла. Комбинација експанзионог таласа иза фронта удара и веома брзо ширење гасовитих продуката детонације распарчава тло и избацује га увис у ваздух. Неки од ових парчића падају назад око кратера формирајући тзв. усне кратера, а неки падају назад у кратер практично га поново пунећи. (Cooper & Kurowski, 1996)

Процесом експлозије пуњења ослобађа се велика енергија којом се материјал подлоге избацује навише (*ejecta*) да би се услед гравитације део тог материјала вратио уназад

[15] Ilustrovani engleski rečnik Oxford/Prevod Zvezdana Šelmić, Novi Sad, Mladinska knjiga nova, 2002. p.194.

(*fallback*), било због великог угла избацивања било због мале брзине избацивања, и покрио површину стварног кратера. Првобитни материјал подлоге који је био у контакту са избаченим материјалом је зона лома (*rupture zone*) чији је материјал распарчан импулсом притиска. Зона поред је пластична зона (*plastic zone*) која је померена дејством експлозивног ударног таласа али у њој нема пукотина. Иза ове зоне је еластична зона (*elastic zone*) у којој је материјал подлоге у зони еластичних деформација. Још давне 1964. дате су дефиниције појмова видљивог (*apparent*) и стварног (*true*) кратера а које су уочљиве у профилу кратера. Видљив кратер је површина која је видљива гледано са ивице кратера мерено од првобитне површине подлоге, а коју чини и избачени материјал подлоге који се вратио уназад, док је стварни кратер гранична површина између зоне лома и материјала који се вратио назад у кратер. (Nordyke, 1964) У земљи у којој је дошло до стварања кратера разликују се три зоне: зона компресије, зона деструкције и зона ударног таласа. У зони компресије тло је разбијено и његови делови су истиснути из зоне, док је зона деструкције карактеристична по томе што су везе између честица средине разбијене. У зони ударног таласа ударни талас једино узрокује осцилаторно кретање средине али без кидања веза између честица средине. (Jaramaz, 2000:85) Већина аутора слаже се са овом терминологијом, а која је иницирана од стране *Lawrence Radiation Laboratory in Livermore, California* и *Atomic Energy Commision Nevada Test Site*, далеке 1963.

Како је врло често онемогућено експериментало испитивање удара великим брзинама у свемиру, то се у многим истраживањима у планетологији вршила апроксимација дејством експлозије великих пуњења када је сматрано да је стварање кратера након експлозије аналогно ситуацијама у планетологији. (Melosh, 1985) Основи физике тврде да честица веома мале масе поседује значајну кинетичку енергију за стварање ударног кратера, те њена брзина може једино да буде резултат експлозивне детонације. (Baker & Winn, 1998:415). С тим у вези значајан је број објављених референци о кратерима у планетологији, а који су добијани дејством сферног експлозивног пуњења на одговарајућу подлогу. (Schmidt & Housen, 1987; Holsapple, 1987) У свом раду аутори дају аналогију појаве удара великим брзинама (ред величине неколико *km/s* колики је и ред величине брзине детонације) са експлозијом сферног пуњења у ваздуху где износи закључак да ваздушни удар створен експлозијом садржи око 0.7% кинетичке енергије ударног пројектила. Приликом удара такође долази до стварања компресионог таласа који резултује стварањем уздигнућа на ободу кратера. (Gee, et.al., 2007) Кроз процес

експлозије ствара се механичка енергија која сабија подлогу која је у контакту са експлозивним пуњењем услед експлозивног таласа који узрокује дисконтинуитет у материјалу подлоге тј. компримује подлогу. Најпре се у подлози јављају напрезања услед притиска да би касније подлога пуцала услед дејства гасовитих продуката експлозије (ширење ових продуката дешава се мањом брзином од брзине ударног таласа). Овај процес представља неку врсту ерозивног процеса с обзиром да гасови уклањају материјал подлоге из кратера (процеси у страној литератури познати као *scouring* и *spalling*). Како наводи Yallop, „...величина кратера зависи од локације експлозивног пуњења у односу на тло, врсте тла као и од врсте и масе коришћеног експлозива“. (Yallop & Kind, 1980:40) Уколико је експлозивно пуњење постављено на великој дубини испод површине тла (укопано пуњење – *height of burst*), онда земља изнад пуњења онемогућава својом масом било какву манифестацију експлозије на површини земље. Ако је маса пуњења мања од критичне масе кратер се уопште неће формирати. Што је експлозивно пуњење ближе површини тла, формираће се плићи и шири кратер. Пуњење постављено изнад површине тла експлозијом ствара плиће и уже кратере од оних створених пуњењем постављеним на површини, а изнад критичне висине неће уопште бити кратера.

Механизам стварања кратера је веома сложен и зависи од физичких карактеристика ваздуха, тла и међусобне интеракције ваздух-тло. Најважнија варијабла у дефинисању облика и димензија кратера је маса експлозива али и дубина укопавања (Luccioni et al., 2009), која у овом раду неће бити разматрана с обзиром да је овде реч само о површинској експлозији. Врста тла утиче на величину кратера на тај начин што експлозија на мекшем и растреситијем тлу даје већи кратер. Врста коришћеног експлозива утиче на величину кратера на тај начин што бризантни експлозиви (карактерише их већа брзина детонације, већа енергија експлозије и сл.) стварају веће кратере. Међутим, дешава се да код подземних експлозија неки ниско бризантни експлозиви стварају већи кратер од високобризантног експлозива исте масе уколико је пуњење на већој дубини укопавања и то због карактеристике – гасност експлозива, што није случај код експлозија на површини земље када нискобризантни експлозив може детонирати остављајући мало трага на површини са којом је био у контакту. Сем од наведених фактора, величина кратера зависи и од начина постављања експлозивног пуњења у односу на тло тј.од контактне површине експлозивног пуњења и тла, облика експлозивног пуњења и места иницирања. Са аспекта форензике, од изузетног је

интереса за истрагу податак о врсти и маси коришћеног експлозива. Метод процене масе на основу димензија кратера може послужити за проверу других метода за процену масе експлозива. (Бјеловук, 2005) На основу димензија кратера може се проценити и облик и димензије експлозивног пуњења, а тиме и указати на извор снабдевања с обзиром да се експлозивна пуњења углавном израђују по стандардним процедурама са дефинисаним карактеристикама у наменској индустрији.

Кратер може бити и извор фрагмената коришћеног експлозивног средства. Ако је експлозив био смештен у кућишту, парчад кућишта се радијално разлеће. Ако је кратер формиран у земљи или другом меканом материјалу фрагменти ће пенетирати у дно и зидове кратера. Због тога, након првобитних испитивања кратера, његовог снимања и узимања узорака за хемијско испитивање, кратер треба очистити од вишка земље и земљу претражити, ради проналажења примарних фрагмената направе.

Из напред наведеног може се закључити да је кратер веома значајан траг експлозије из кога се може одредити узрок експлозије.

4. ПРЕТХОДНА ИСТРАЖИВАЊА У ВЕЗИ СА РЕЛАЦИЈАМА ИЗМЕЂУ КАРАКТЕРИСТИКА КРАТЕРА, ТЛА И ЕКСПЛОЗИВА И ПРЕГЛЕД ПОСТОЈЕЋИХ МАТЕМАТИЧКИХ МОДЕЛА ЕФЕКАТА ЕКСПЛОЗИЈЕ

У данашње време емпиријске формуле добијене из експерименталних испитивања и нумеричке анализе могу бити веома корисне у предвиђању одговора тла и структура на оптерећење експлозијом. Већина информација о кратерима насталим као последица експлозије које се могу наћи у стручној литератури базиране су на експерименталним подацима. Експериментални тестови формирања кратера су моћан алат при проучавању експлозија, разорне моћи експлозива, одговора структура и тла на ову врсту оптерећења. (Luccioni et al., 2010) Емпиријске једначине које дају везу између узрока и ефеката експлозије бризантних експлозива на околину, а које се користе у форензичке сврхе за брзу процену масе коришћеног експлозива, обично означавају релацију између масе експлозивног пуњења и запремине одн. димензија кратера. (Adushkin & Khristiforov, 2004; Бјеловук, 2005) Маса експлозива која се може добити из димензија кратера има веома велики форензички значај. Неки емпиријски изрази у вези са димензијама кратера могу се наћи у стручној литератури с тим да се мора рачунати са чињеницом да њихови резултати имају известан коефицијент варијације. (Ambrosini et al., 2005) За процену масе коришћеног експлозива могу се користити и емпиријски методи предвиђења ефеката експлозије, који у основи представљају корелације са експерименталним подацима. Многи од ових приступа су ограничени опсегом експеримената. Прецизност експерименталних једначина се разликује како се експлозив приближава подлози, тј. како експлозија постаје површинска. (Remennikov, 2003) Преглед постојећих једначина за прелиминарну процену масе коришћеног експлозива на основу димензија/запремине кратера, а које се пронађене у стручној литератури током истраживања дате су у наставку текста. Прорачуне у вези са стварањем кратера радио је *Robinson* далеке 1944. године и табеларно даје експерименталне податке о формирању кратера, користећи англосаксонске јединице *lb* ($1lb$=0,4536kg) и *ft* ($1ft$=0,3048m) масе и дужине (Lees, 1996:536), што одговара јединицама у СИ систему датим у Табели 1.

Табела 1. Димензије кратера (према *Robinson*-у)

Експлозив		**Димензије кратера**		
Врста	**Маса пуњења *[kg]***	**Пречник *[m]***	**Дубина *[m]***	**Запремина *[m^3]***
Динамит	22,68	1,8288	0,6096	0,8495
Динамит	1088,64	9,4488	2,7432	90,6137
Амонијум нитрат	4082400	121,92	27,432	283168

Многи аутори су се бавили корелацијом између масе експлозива и димензија кратера. Тако, *Nordyke* се у свом раду осврће на релацију између масе експлозива *W* и димензија кратера *r,* а која је добијена на бази димензионе анализе у виду $W^{1/3}$ и коју критикује јер не узима у обзир гравитацију, те предлаже релацију $W^{1/3.4}$одн. $W^{1/4}$ када се посматрају димензије стварних кратера. У тим истраживањима разматране су експлозије великих експлозивних пуњења на различитим дубинама укопавања у подлози од песка и резултати презентовани у виду графика. (Nordyke, 1964.) *Knox* и *Terhune* у свом раду такође испитују велике експлозије и развијају дводимензионални нумерички модел стварања кратера у пустињском алувијуму. (Knox & Terhune, 1964). *Cooper* такође развија процедуру за предвиђање димензија кратера последица експлозија (нуклеарних и хемијских експлозива) у различитим геолошким срединама базирану на емпиријским подацима. Сврха ових истраживања била је да се уреди ефикасност кратеровања различитих геолошких материјала где се износи закључак да је кратеровање услед површинских експлозија много компликованије за описивање услед дешавања процеса на граници двеју различитих средина. Резултати тих испитивања дати су одговарајућим дијаграмима. (Cooper, 1976).

Емпиријска једначина *Olsen*-а за израчунавање димензија кратера који се ствара детонацијом на тлу уобичајених карактеристика дата је коришћењем англосаксонских јединица [*lb*] и [*ft*] (Lees, 1996:536), а након трансформације у јединице СИ система гласиће:

- $m_e = 0{,}2173V_k^{7/8}$ ..... *(1)*

где је: $V_k[m^3]$ – запремина кратера, $m_e[kg]$– маса експлозива. Касније, 1987. г. *Marshal* је користећи релације *Robinson*-а и *Olsen*-а дошао до једначине (Lees, 1996:536):

- $d=3V_k^{0,5}/h$ …….....… (2)

где је: d – пречник кратера [m], h - дубина кратера [m], V_k - запремина кратера [m^3]. Подразумевајући да је запремина кратера пропорционална кубу полупречника кратера ($V_k \sim r^3$) он је сматрао да је $r \sim m_e^{1/3}$. У стручној литератури налазе се и следеће релације између масе коришћеног експлозива и димензија кратера:

- $m \sim d^3/16$, (Girard, 2008) .....(3)

- $d = 0.8\ (m_e)^{1/3}$, (Noon, 2001:52) .....(4)

где су: $m[kg]$ - маса експлозива у еквивалентима ТНТ и $d[m]$ - пречник кратера.

У Табели 2 дат је однос јачине неког експлозива у односу на ТНТ преко корекционог фактора (ТНТ еквивалент)

Табела 2. Однос јачине експлозива према ТНТ и корекциони фактор (ТНТ еквивалент)

Р.бр.	**Експлозив**	**Однос јачине експлозива према ТНТ**	**Корекциони фактор**
1	Амонекс	0,63	1,58
2	Тетрил	1,20	0,83
3	Пентрит; Октоген	1,40	0,71
4	Хексоген	1,35	0,74

Претпостављајући да је кратер формиран површинском експлозијом облика дела сфере и да је дубина кратера једнака ¼ његовог пречника *Noon* наводи емпиријску формулу за процену експлозијом избаченог материјала (Noon, 2001:52):

- $V_k=1/3[\pi h^2(3r-h)]=0,205\ m_e$, (Noon) ……..…….(5)

где је V_k [m^3] запремина кратера, а $m_e[kg]$ еквивалент масе ТНТ.

Yallop наводи следећу релацију између каратеристика кратера и експлозива:

- $V_k = k\, m_e^{\,1.14}$, (Yallop, 1980) ……..... (6`)

где је V_k - запремина кратера, k - константа, m_e - маса експлозивног пуњења, а одговарајућа формула за експлозију на површини тла, која је у складу са СИ системом:

- $d^3 = 16\, m_e$ ..... (6)

где је m_e [kg] маса експлозивног пуњења, d [m] пречник кратера.

Боресков даје емпиријску једначину за процену масе експлозива m_e[kg] на основу карактеристика кратера у следећем облику:

- $m_e = 38\, k_1\, h^3\, (0{,}4+0{,}6n^3)$ (ј-на Боресков, цитирано према: Стаматовић, 1996) ... (7)

где је k_1 - коефицијент који зависи од врсте тла, h[m] - дубина кратера, r[m] - радијус кратера, $n = r/h$ - однос димензија кратера. У Табели 3. дате су вредности коеф. k_1 за ТНТ и привредни експлозив у зависности од подлоге на којој се догодила експлозија.

Табела 3. Вредности коефицијента k_1 за ТНТ и привредни експлозив

Р.бр	**Врста тла**	k_1	
		ТНТ	**Привредни експлозив**
1	Растресита земља	0,43	0,5
2	Угажена земља	1	-
3	Земља са каменчићима	1,17	1,36
4	Кречњак	1,87	2,15
5	Гранит	2,25	2,58
6	Земља са песком	0,85	0,93
7	Влажан песак	1,1	1,27
8	Глина са песком	1,29	1,5
9	Бетон	3,12	3,59

Према *Власову*, маса коришћеног експлозивног пуњења може се израчунати из:

- $m_e = 2\pi\rho_{tla} k_2\, r^3/100$ [kg], (једначина Власов -а, Бјеловук, 2005) ……..... (8)

где је $\rho_{tla}[kg/m^3]$ - густина окружења, k_2 - коефицијент који одређује критичну брзину потребну за дробљење окружења. У Табели 4. дате су вредности коефицијента k_2 у зависности од врсте подлоге на којој се догодила експлозија.

Табела 4. Вредности коефицијента k_2

Р.бр	**Врста тла**	k_2
1	Песак, растресита земља	1
2	Угажена земља	2
3	Земља са каменом	2,5
4	Камен	3
5	Залеђена земља	4
6	Бетон, асфалт	5

Покровский даје следећу релацију између карактеристика кратера изражену кроз полупречник $r[m]$ и карактеристика експлозива изражену преко густине ρ_e $[kg/m^3]$:

- $m_e = 0{,}02r^3\rho_e\,[kg]$ (једначина Покровског, Покровский & Федоров, 1957), ... (9)

Kinney даје емпиријску једначину за процену масе коришћеног експлозива $[g]$ на основу полупречника кратера $r[cm]$ у облику:

- $m_e = 0{,}032r^3\,[g]$, (једначина Kinney, Yallop & Kind, 1980), ... (10)

Cook предлаже процену масе коришћеног експлозива $[g]$ на основу карактеристика кратера изражених преко полупречника кратера $r[cm]$ и дубине кратера $h[cm]$ из:

- $m_e = 0{,}132\,k_3(r^2h)^{0{,}877}\,[g]$ (једначина Cook, Yallop & Kind, 1980), ... (11)

где је k_3 коефицијент (вредности дате у Табели 5.) зависно од врсте подлоге.

Табела 5. Вредности коефицијента k_3

Р.бр	**Врста подлоге**	k_3
1	Земља	1
2	Земља са каменом	1,5
3	Залеђена земља	2
4	Бетон, асфалт	5

Merrifield даје везу радијуса кратера $r[m]$ и масе експлозива $m_e[kg]$ (Merrifield, 2000):

- $r=k_4 m_e^{0.33}$ ..... (12)

где је $m_e[kg]$ маса експлозива у ТНТ еквивалентима, k_4 коефицијент који зависи од подлоге (k_4 = 0.2 за веома тврдо тло, k_4 = 0.7 за веома меко тло).

Szuladzinsky даје везу масе експлозива и пречника кратера (Szuladzinsky, 2010:684):

- $m_e = k_5 d^2 + k_6 d + k_7$ ..... (13)

где је $m_e[kg]$ - маса експлозива, $d[m]$ - пречник кратера, k_5, k_6, k_7 - коефицијенти (дати у Табели 6.)

Табела 6. Вредности коефицијената k_5, k_6, k_7

Р.бр.	**Врста тла**	k_5	k_6	k_7
1.	Суви песак	34.84	−230.4	466.5
2.	Сува песковита глина	28.65	−208.9	466.3
3.	Мокар песак	22.21	−183.7	465.4
4.	Сува глина	18.01	−165.3	464.6
5.	Мокра песковита глина	15.05	−150.8	462.8
6.	Мокра глина	8.02	−110.0	462.3

Јарамаз наводи да се радијус зоне деструкције $R_d[m]$ приближно може израчунати из: $R_d=k_d(m_e)^{1/3}$ (Jaramaz, 2000:85), што након трансформација у случају површинске експлозије на земљи омогућава израчунавање масе експлозива $m_e[kg]$ из:

- $m_e = k_d^{-3}(r^2+h^2)^{1,5}$ ..... (14)

где су: k_d - коефицијент тла дат у Табели 7. (Jaramaz, 2000:86), $r[m]$ -полупречник кратера и $h[m]$ - дубина кратера.

Табела 7. Вредности коефицијента за различите врсте тла

Р.бр.	**Врста тла**	
1	Растресита земља	1,4
2	Песак	1-1,04
3	Глина са песком, кречњак	0,96

За површинске експлозије на неармираном бетону у литератури се могу наћи следеће емпиријске релације између карактеристика експлозивног пуњења и карактеристика кратера, а могу се користити за прелиминарну процену димензија експлозивног пуњења, а на основу димензија кратера. Тако за случај површинске експлозије полусферног пуњења масе $m_e[kg]$ полупречника $r_e[m]$ на обичном бетону (чврстоће F_c=46MPa) створиће се кратер радијуса $r[m]$, а зависности између полупречника кратера и полупречника полусферног пуњења су: (Szuladzinsky, 2010:685) су:

$r = 3{,}65r_e$, ... (15)

док је за бетон високе чврстоће F_c = 200 MPa

$r = 5{,}4r_e$ .....(16)

У ранијим истраживањима извршена је анализа једначина (7) - (11) и дате су препоруке за најпоузданију једначину процене масе експлозива (мала маса експлозива, врста и стање подлоге, начин постављања пуњења и иницирања). (Бјеловук, 2005; Bjelovuk, et.al.2012; Bjelovuk, et.al.2013; Bjelovuk, et.al.2015;) Овим радом та истраживања су проширена. Једначине (2), (15) и (16) не дају везу између масе коришћеног експлозива и карактеристика кратера, те оне неће бити разматране у истраживању. Иако су напред наведене једначине поједностављене с обзиром да не узимају у обзир све карактеристике тла, оне се могу употребити за прелиминарну процену масе пуњења на основу димензија кратера са обавезним рачунањем на одступања.

Да закони скалирања, а који иначе служе за евалуацију ефеката експлозије на структуре и тла, нису исти за све масе, облике и локације експлозива уочили су и *Luccioni* и *Ambrosini*. Они су потврдили став да постојеће емпиријске формуле за предвиђање димензија кратера базиране на кубном корену масе експлозива $r \sim m_e^{1/3}$ нису адекватне за велике масе експлозива. Такође, они износе тврдњу да пречник кратера може бити приближно симулиран линеарном функцијом $m_e^{1/4}$ (Luccioni &

Ambrosini, 2010). У својим радовима ови аутори износе емпиријску једначину за предвиђање пречника кратера $d[m]$ на основу масе употребљеног експлозива $m_e[kg]$, $d=0{,}834m_e^{1/4}$, (Ambrosini & Luccioni, 2009; Luccioni et al., 2010), а коју су тестирали за велика експлозивна пуњења - преко $1000kg$. Она се такође може искористити за процену масе експлозива на бази димензија кратера и након трансформација гласиће:

- $m_e = 2{,}067\, d^4$ ……..... (17)

Вредности маса експлозива које су добијене из свих наведених једначина сем једначине (9) у којој је карактеристика експлозива узета преко густине експлозива $\rho_e[kg/m^3]$ треба кориговати множењем корекционим фактором који је у вези са односом јачине конкретног бризантног експлозива према ТНТ, а према Табели 2.

На димензионој анализи и експерименталним испитивањима базиран приступ процесу стварања кратера и узрочно-последичној вези између величине кратера и масе експлозива дао је *Holsapple*. Наиме, у оквиру својих истраживања у планетологији он је користио аналогију стварања кратера при удару великим брзинама са стварањем кратера експлозијом снажних пуњења и димензиону анализу зависности запремине кратера од густине, радијуса и брзине тела које удара о подлогу познатих карактеристика, односно посредно од кинетичке енергије тела, количине кретања и масе тела[16]. Он је уочио сличност између стварања кратера експлозијом сферног пуњења и стварања кратера ударом сферним телом, с тим што се специфична енергија ударача замењује специфичном енергијом експлозије. На основу ове анализе даје математички модел преточен у компјутерски програм *Crater Sizes from Explosions and Impacts*, који се може наћи *online*.[17] У оквиру програма дате су могућности за избор врсте циља, одн. подлоге на којој настаје кратер. Тако је у оквиру избора подлоге дата могућност да се изабере суви песак, вода, Месечева површина, сува земља, мокра земља, тврда земља/мека стена, тврда стена, хладан лед, др. врста земље и др. врста стена. Избор подлоге дефинише густину, кохезију, угао трења и порозност. Такође дата је могућност избора гравитације (Земља, Месец, Астероид и др.) и избор притиска (атмосферски притисак, нулти притисак и др.). У програм је потребно унети и карактеристике експлозива (АНФО, ТНТ, ПЕТН или нуклеарни експлозив), облик експлозивног пуњења (сферно, полусферно или цилиндрично пуњење 1:1) и положај

[16] http://keith.aa.washington.edu/craterdata/scaling/theory.pdf доступан 21.1.2008.
[17] http://keith.aa.washington.edu/craterdata/scaling/index.htm доступан 21.1.2008.

пуњења у односу на подлогу (полуукопано, положено на земљу и потпуно укопано). Као резултат унесених података програм даје величину ископаног кратера: пречник кратера, пречник обода кратера, дубина кратера, висина тзв. „усне“ кратера, слику профила кратера, ископану запремину, време формирања кратера као и опис режима кратеровања и избачене масе тла. Како се истраживања у вези са стварањем кратера у планетологији односе на испитивања са коришћењем великих маса експлозивног пуњења, то је у програму евидентна напомена да „кратери са пречником мањим од $10m$ у стенама и леду се карактеришу распадањем површине а не механизмима растезања и ови резултати могу бити валидни за запремину али не и за облик кратера.“

Запажање постојања корелације између карактеристика кратера и масе експлозива, а као последица научне радозналости, на крају резултира дескрипцијом или стварањем математичког модела и представља активан чинилац у стварању нових научних сазнања из области стварања кратера површинском експлозијом. Детаљно сагледавање проблема стварања кратера ради касније форензичке анализе веома је сложено. Наиме, реч је о експлозији пуњења бризантног експлозива на граници између две средине различитих карактеристика. Поставити математичку формулацију и модел посматране појаве стварања кратера веома је сложен задатак. У овом раду биће дат покушај описивања једног веома сложеног феномена кроз моделирање карактеристика кратера.

4.1 Нумерички модели ефеката експлозије

Процес експлозије на површини подлоге сврстава се у високо динамичке процесе с обзиром на велику брзину промене деформације подлоге. Дуго трајање процеса захтевало би комплетне једначине стања с обзиром да провођење топлоте учествује у тим екстремним условима.

Ефекти експлозије на подлогу могу се проучавати кроз тестове у виду реалних експерименталних експлозија, редукованих тестова са коришћењем експлозивног пуњења у умањеној величини (као у центрифугалним тестовима у планетологији) и нумеричким моделима. Експерименталне експлозије захтевају употребу бојевог експлозивног пуњења и носе велике ризике, нарочито кад су у питању велика експлозивна пуњења, захтевају пажљиво руковање и тешко су изводљиви у цивилним

истраживањима. (De, 2012) Такође, експерименталне експлозије су скупе и захтевне у погледу планирања, организације и реализације услед потребе за прецизним мерним инструментима који би требало брзо да региструју податке мерених величина (притисак и сл.). Информације о подацима са ранијих експеримената често нису јавно доступне јер су ти тестови спровођени од стране безбедносних институција и припадајућих агенција и означене су као поверљива информација. Зато нумеричке симулације имају веома велики значај у анализи оптерећења услед експлозија.

Нумеричка симулација процеса динамичког оптерећења подразумева адекватну дискретизацију проблема у времену и простору и математички опис понашања материјала подлоге. Хидрокодови (*hydrocodes*) који се још зову и кодови ширења таласа, су типична врста нумеричких алата за симулацију процеса разарања и удара. Развијени су раних педесетих година прошлог века ради симулирања физичких ефеката нуклеарног оружја са хидродинамичким приступом решавања једначина одржања масе, енергије и количине кретања. Основе развоја хидрокодова постављене су у *Los Alamos National Laboratory* (LANL) и *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL). Први компјутерски кодови за оваква израчунавања развијани су 60-их и 70-их година прошлог века. Моделирањем процеса детонације бавио се и *Mader* који је развио *SIN* и *2Dl*, као и Ојлеров код *2DE* (Mader, 1979). *Hallquist* је развио *DYNA2D*.

Данас су доступни комерцијални компјутерски хидрокодови за нелинеарну динамичку анализу одн. симулирање процеса рушења и удара, а који имају своје корене у овим кодовима. Типични представници хидрокодова који су се користили за симулацију експлозије су: DYTRAN, EPIC, HEMP, HULL, CTH, BLASTX, FEFLO, FOIL, SHARC, DYNA 3D, ALE3D, Air3D, CONWEP, ABAQUS, ANSYS-AUTODYN, LS-DYNA и др. (Ngo, et.al., 2007) Најчешће коришћен програм за нумеричко моделирање проблема великих деформација као што су експлозије, удари и колизије је ANSYS-AUTODYN. Они користе принципе одржања масе, енергије и количине кретања употребом диференцијалних једначина у условима нестационарног динамичког струјања. Карактеристични елементи укључени у хидрокодове односе се на решење једначина одржања масе, енергије и момента количине кретања, формулацију нелинеарне једначине стања за стварање и ширење ударног таласа, конститутивне једначине за еластично и нееластично понашање материјала подлоге укључујући оштећење, лом и понашање после лома, произвољну и експлицитну временску интеграцију. Решење

парцијалних диференцијалних једначина које описују динамичке деформације и енергетска растурања укључује временски раздвојен опис процеса и ефекте ширења таласа. Ове једначине треба да буду решене и дискретизоване у времену и простору. Како аналитичка решења ових сложених процеса нису једноставна развијени су и развијају се нумерички методи ради налажења приближних решења. Део те апроксимације и филозофија нумеричких метода је тзв.дискретизација једначина тј. њихово селективно решење у коначном броју просторних локација и временским тренуцима унутар посматраног домена. Просторна дискретизација основних једначина може бити постигнута различитим врстама дискретних коначних метода: метод коначних елемената, метод коначних разлика, коначних запремина и *mesh-free* метод. Формулисани у Лагранжовој или Ојлеровој динамици резултујући индивидуални методи су често подељени за одређене структурне компоненте или услове оптерећења. Што се тиче временске дискретизације, експлицитне и имплицитне шеме, а које су базиране на коначним диференцијалним апроксимацијама постоје за прорачун временске зависности основних једначина. Док експлицитна формулација захтева мање прорачуна у поређењу са имплицитном, њена стабилност и прецизност ограничене су величином временског корака. За већину динамичких процеса у условима разбијања и удара шема експлицитне интеграције је пожељнија с обзиром на резолуцију ефеката простирања таласа и захтева екстремно кратке временске кораке реда величине 10^{-9}s што елиминише предност имплицитних метода. *Mesh* решења временски зависних једначина у хидрокодовима су једноставно организована. Најпре треба дефинисати почетне услове за цео систем у почетном тренутку времена ($t=t_o$), а затим проценити максималну величину стабилног временског тренутка и решити сет дискретизованих диференцијалних једначина при чему треба користити резултате за следећи временски корак (Hiermaier, 2009).

Могућност нумеричке симулације ширења лома услед детонације се у данашње време ради кроз компјутерске нумеричке симулације одн. хидрокодове и то највише у сврхе моделирања ефеката бојеве главе на циљу. Мултиматеријални 2Д Ојлеров хидрокод развијен је 1998. од стране *Jones*-а, *Kemister*-а и *Borg*-а за моделирање ефеката детонације на околину. Овај код има могућност да моделира стандардне војне експлозиве који имају идеално понашање при детонацији, као и могућност моделовања одговора енергетских материјала. Код решава систем једначина (закони одржања масе, момента количине кретања и енергије) за стишљив флуид. (Jones et.al, 1998)

Нереагујући материјали су описани *Mie-Gruneisen* или *Tait* једначином стања, док су идеални експлозиви описани коришћењем *BKW (Becker-Kistiakowsky-Wilson)* једначином стања и *Forest Fire* моделом реакционе брзине или *Jones-Wilkins-Lee* једначином стања. Феномен детонације се дешава у веома кратком времену и уобичајено је претпоставити да је пренос енергије у виду топлоте, вискозности и радијације занемарљив у поређењу са кретањем продуката детонације. Под овим условима јачина било ког материјала је занемарљива и може се сматрати да материјал има хидродинамички одговор, те су адекватне једначине које описују одговор материјала Ојлерове једначине:

$\partial\rho/\partial t + \nabla(\rho v) = 0$ ..... (18)

$\partial(\rho v)/\partial t + \nabla(\rho v v) = -\nabla P$..... (19)

$\partial E/\partial t + \nabla(Ev) = -\nabla Pv$ ..... (20)

Jones-Wilkins-Lee једначина стања за бризантне експлозиве (Lee, E.L., Hornig, H.C., Kury, J.W. (1968) Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products, Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-50422), а која је добијена од изентропске једначине стања комбинована са *Mie-Gruneisen* једначином стања, се користи да се опише понашање продуката детонације и гласи:

$p = A(1-w/R_1 v)e^{-R_1 v} + B(1- w/R_2 v)e^{-R_2 v} + wE/V$ ..... (21)

$v = \rho_0/\rho$ ..... (22)

$E = \rho_0 v$ ..... (23)

где је: p - притисак [Mbar], A, B ,R_1, R_2, w – константе (*JWL*-параметри) за експлозив.

Рађена су истраживања у којима се дају резултати нумеричког прорачуна одговора тла на експлозију пуњења лоцираног изнад површине земље при чему долази до формирања кратера. Уочено је да је предвиђање одговора земљишта као и механизам формирања кратера веома комплексан проблем с обзиром на то да се површинска експлозија одвија на граници двеју различитих средина (Iturrioz & Riera, 2001). *Wang* је применом програма LS-DYNA3D радио нумеричко моделирање експлозије укопаних

мина на оклопне транспортере изнад земље. За валидацију нумеричких модела коришћени су резултати реалних експлозија у песку (Wang, 2001).

У 2003. у Хјустону, Тексас (САД) одржане су радионице из кратеровања ударом, на тему *Превазилажење празнине између моделирања и посматрања*. У свом раду Иванов каже да без обзира на велику могућност коришћења рачунара проблем моделирања процеса стварања кратера подразумева разне специфичне моделе динамичког понашања стенских масива кроз широк опсег параметара степена деформације, као и геолошких и геофизичких (Ivanov, 2003). Верификација нумеричких модела подразумева поређење компјутерских резултата са максималним могућим бројем посматраних података. Од направљених модела кратера – последице удара у планетологији мало се који бави систематским истраживањем облика кратера и пречника кратера. Његов је закључак да нумерички модели кратера насталих ударом могу бити верификовани са геолошким и геофизичким подацима са терена.

У својим радовима неки аутори разматрају примену нумеричких метода анализе експлозија кроз програмске пакете – тзв.“хидрокодове“ (engl. *hydrocodes*) са обавезним нагласком за потребном практичном верификацијом аналитичких процедура. Тако су анализирана оштећења у бетону и тлу, а која су настала услед дејства експлозије. У својим истраживањима они углавном користе програм AUTODYN (Ambrosini, et. al., 2002; Wang & Lu, 2003; Luccioni, et. al., 2004; Wu, et. al., 2004; Ambrosini, et. al., 2004; Ambrosini, et. al., 2005; Luccioni, et. al., 2006; Luccioni, et. al., 2009). *Luccioni* је са сарадницима у свом раду користила компјутерски програм AUTODYN за моделирање кратера формираних у сувом тлу након експлозије различитих величина пуњења и добијени резултати су упоређивани са резултатима експерименталних експлозија великих пуњења (Luccioni, et. al., 2009). У својим радовима они су доказали да је могућност примене нумеричке симулације оправдана, ефикасна и поуздана. Такође, резултати ранијих нумеричких истраживања ових аутора су показала да када су у питању експлозије компактних ТНТ пуњења мањих од 100*kg* нема разлике у кратерима који су створени пуњењима исте масе али различитог облика (Luccioni, et. al., 2009; Luccioni, et. al., 2010). Овај закључак је искоришћен при извођењу експерименталних експлозија одн. при избору различитих облика расположивих стандардних пуњења масе до 10*kg*. *Choi* и сарадници (Choi, et. al., 2006) у свом раду такође користе компјутерски програм AUTODYN за моделирање ефеката експлозије на подземне

структуре. Они су проучавали утицај масе експлозива, димензија и природе подземне структуре, растојања од центра експлозије и својства тла и развили дијаграме за процену оштећења при оцени рањивости тунела. *De* у свом раду (De, 2012) такође користи AUTODYN за нумеричко моделирање површинске експлозије на песку ради анализе ефеката на подземне тунеле. *Liu* и сарадници су у свом раду за нумеричку симулацију експлозије у бетону и тлу користили LS-DYNA (Liu, et al., 2008).

Програм ABAQUS коришћен је у раду *Yang* и сарадника који су изводили експлозије на стенама у циљу предвиђања фрагментације стене и величине оштећења, (Yang et. al., 1996;) док је *Nagy* са сарадницима испитивао одговор бетонских структура укопаних у земљу на површинску експлозију кроз анализу простирања експлозивних таласа. *Nagy* је за анализу користио 2Д осносиметрични модел разматрајући само експлозивно пуњење, тло и укопану бетонску структуру док ваздух није подвргао симулацији и анализи, а користио је формулацију модела *Arbitrary Lagrange Euler* (ALE) за експлозивно пуњење и зону тла око експлозивног пуњења у ABAQUS. (Nagy et al., 2009.). За симулацију брзог динамичког оптерећења сендвичастих структура услед експлозивног ударног таласа конвенционалних оружја такође је коришћен ABAQUS од стране истраживача *Lahiri* и *Ho*. (Lahiri & Ho, 2012). Како су у многим примерима нумеричких анализа оптерећења експлозијом узете приближне вредности карактеристика тла понуђене у програму, наведене анализе нису апсолутно прецизне, али су употребљиве. Анализе експлозија у форензичкој пракси су рађене једноставним аналитичким методама (Baker, et al., 1983, Smith & Hetherington, 1994). Генерално, израда аналитичких модела је веома компликована, што је приметио и *Cooper* који оправдава приступ проблему кроз димензиону анализу. "...Због тога што не можемо категорисати и контролисати сва различита стања и врсте тла (земља, шљунак итд.) не можемо прецизирати аналитичке моделе процеса стварања кратера, стога може се прибећи и димензионим анализама..." (Cooper, 1996:421)

У овом раду ће се методом димензионе анализе дати зависности између појединих величина – карактеристика кратера и карактеристика подлоге и експлозива.

4.2 Димензиона анализа у проблемима ефеката експлозије

У процесу израде математичког модела потребно је идентификовати променљиве које утичу на понашање и одредити адекватне релације. У случају једне зависно променљиве ова процедура доводи до неке непознате функције. У неким ситуацијама природа те функције произилази из давања неких разумних претпоставки базираних на природним законима или претходних искустава. Са друге стране, посебно за оне моделе направљене да предвиде неки физички феномен, може бити тешко или немогуће направити решив експликативни модел услед сложености проблема. У појединим случајевима може се спровести серија експеримената ради одређивања како је зависно променљива повезана са различитим вредностима независно променљивих. Димензиона анализа може да помогне да се одреди како су изабране променљиве повезане као и за смањење броја експерименталних података који треба да се прикупе (Giordano, et.al., 2003).

Димензиона анализа отелотворује једноставан концепт који обезбеђује моћан и економичан приступ решавању комплексних проблема у физици и инжењерству. Концепт се заснива на премиси да све физичке величине имају димензије и да се физички закони не мењају са променом мерних јединица. Свака појава која се посматра мора бити описана димензионо коректним једначинама. Тако, једначина која представља функционалну зависност неких променљивих мора бити димензионо хомогена, тј. њено решење мора бити инваријанта у промени мерних јединица. Иако је овај концепт препознат још далеке 1761. од стране *Francois Daviet de Foncenex* његове практичне последице нису у потпуности реализоване све до 1914. када је *Edgar Buckingham* развио тзв. π - теорему (уколико функционална зависност укључује бројне варијабле и N основних јединица мере, онда се зависност може написати према N бездимензионих параметара у односу на полазне променљиве). Након димензионе анализе треба спровести експерименте ради предвиђања. Снага димензионе анализе је, између осталог, и у редуковању броја потребних експеримената. Основне физичке величине су маса, дужина и време са одговарајућим димензијама M, L и T сукцесивно, а које представљају симболе који показују како се нумеричка вредност квантитета мења када се јединица мере мења на одређене начине. Димензије се повезују сходно алгебарским операцијама укљученим у дефиниције, тј. неке физичке величине

представљају производе M, L и T са одговарајућим експонентима. Сваки производ димензија физичких величина може се изразити преко M^n, L^p, T^q где су n, p и q цели бројеви. У случају да је $M^0\ L^0\ T^0$ производ димензија је бездимензиона величина. Једначине које укључују суму производа који имају исте димензије су димензионо усаглашене. Концепт димензионе усаглашености повезан је са другим важним концептом – *димензиона хомогеност.* Уколико нека једначина укључује само суму бездимензионих производа, онда је та једначина димензионо хомогена. (Giordano, et.al., 2003) Како се примена димензионе анализе на реалне проблеме базира на претпоставци да је решење проблема дато димензионо хомогеним једначинама, то се проблем своди на одређивање облика жељене једначине налажењем одговарајуће бездимензионе једначине, а онда и решавање по зависној променљивој. Да би се извршио овај задатак треба да се одлучи које променљиве улазе у физички проблем који испитујемо и одреде сви бездимензиони продукти међу њима. Бакингемова (*Buckingham*) теорема сумира целокупну теорију димензионе анализе.

Размотримо систем од m линеарних алгебарских једначина са n непознатих $x_1,x_2,...,x_n$. Симболи a_{ij} и b_i означавају реалне бројеве који представљају коефицијенте система a_{ij} док у константе означене са b_i . Решење овог система једначина је низ бројева $s_1,s_2,...,s_n$ за који $x_1=s_1, ..., x_n= s_n$ решава сваку једначину система. Ако је $b_1= b_2 =...=b_m=0$, систем је хомоген. Решење $s_1=s_2 =...= s_n=0$ увек решава хомогени систем и зове се тривијално решење. Кад год су $s_1,s_2,...,s_n$ и $s'_1,s'_2,...,s'_n$ решења хомогеног система једначина, низови $s_1+s'_1,..., s_n+s'_n$ и $cs_1,cs_2,...,cs_n$ су такође решења за било коју константу c. Ова решења се зову сума или многоструки скалар оригиналних решења. Ако су S и S' оригинална решења онда је $S+S'$ њихова сума и cS многоструки скалар првог решења. Ако је $S_1,S_2,...,S_к$, скуп $к$ решења хомогеног система тад је решење $cS_1,cS_2,...,cS_к$ линеарна комбинација $к$ решења, где су c из скупа реалних бројева. Свака линеарна комбинација решења хомогеног система је друго решење система једначина. Циљ у димензионој анализи је да се пронађу сви могући бездимензиони производи променљивих у физичком проблему. Развијамо хомогени систем алгебарских једначина ради одређивања ових бездимензионих производа. Овај систем једначина обично има бесконачно много решења. Свако решење даје вредност експонената који фигуришу у бездимензионим производима међу променљивим. *Buckingham*-ова теорема гласи:

Једна једначина је димензионо хомогена ако и само ако се она може ставити у облик $f(\pi_1,\pi_2,...,\pi_n)=0$ ……..…….....…….. (24)

где је *f* нека функција од *n* аргумената и ($\pi_1,\pi_2,\ldots,\pi_n$) сет бездимензионих производа.

Baker је 1991. године представио димензиону студију за моделирање процеса стварања кратера у случају подземних експлозија у којој је изабрано шест параметара за дефинисање проблема: маса експлозива, дубина укопавања, пречник видљивог кратера, густина тла, параметар чврстоће тла са димензијом напона и параметар чврстоће тла са димензијом Nm^{-3} (Luccioni & Ambrosini, 2010). У стручној литератури може се наћи и димензиона анализа проблема експлозије на површини земље од стране *Schmidt* (Schmidt & Housen, 2007), а који је радио на проблему предвиђања запремине кратера - последице експлозије укопаног сферног пуњења ТНТ. Он је претпоставио да величина кратера зависи од променљивих радијуса кратера $r[m]$, густине тла – $\rho_{tla}[kg/m^3]$ и масе експлозива – $m_e[kg]$ и то тако да је запремина кратера директно сразмерна маси коришћеног експлозива, а обрнуто сразмерна густини земље. У својој анализи он укључује и величину убрзања земљине теже. (Giordano, et.al., 2003:319) Ове анализе су се користиле у планетологији при симулирању удара великом брзином за која су се иницирала пуњења хемијских експлозива велике масе[18]. Како при експлозији великих пуњења (ред величине стотине килограма) долази до стварања великих кратера и разлетања великих парчади земље, као и да је у планетологији вредност гравитације различита код различитих небеских тела, то је логично да се у овој димензионој анализи разматра утицај гравитације.

Крајем 20.в. проучаван је проблем формирања кратера хемијских конвенционалних и нуклеарних експлозија. Вршена су испитивања настанка кратера услед удара великим брзинама на површини Земље и других небеских тела. Иако су физички закони који описују стварање кратера познати кроз законе одржања масе, енергије и импулса и једначинама материјала, сложеност процеса услед дејства високих притисака и температура чини аналитичко и нумеричко решавање веома тешким. Испитивања на терену, нарочито у случајевима великих експлозија, могу бити веома ризична, а у неким случајевима и забрањена. Стога димензионална анализа представља моћан алат (Schmidt & Housen, 2007). У овом раду аутори су претпоставили функционалну зависност запремине кратера $V_k=f(m_e,\rho_e,Q,\rho_{tla},\varphi,g)$, где су $m_e[kg]$ - маса експлозивног

[18] Класификација експлозивних пуњења подразумева постојање категорије малих пуњења S1 до 0,1*kg* и S2 од 0,1*kg* до 10*kg*, средњих пуњења M од 10*kg* до 100*kg*, великих пуњења L од 100*kg* до 1000*kg* и екстремно великих пуњења E - преко1000*kg* (Nurick, et.al., 2006).

пуњења, $\rho_e[kg/m^3]$ - густина експлозива, $Q[J/kg]$- топлота експлозије, $\rho_{tla}[kg/m^3]$-густина тла, φ-угао унутрашњег трења тла, $g[m/s^2]$- гравитационо убрзање.

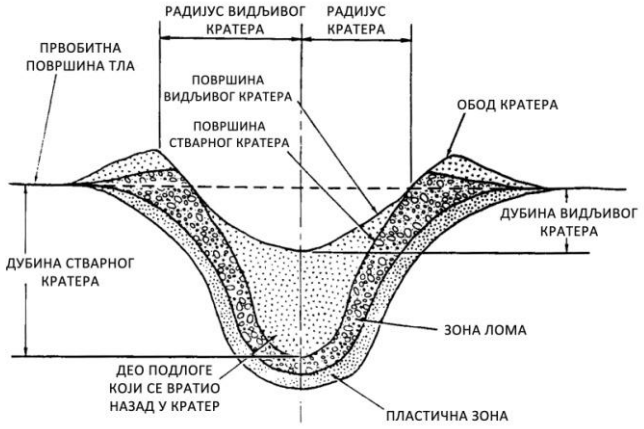
Hamlet, Fussner и др. аутори се такође служе димензионом анализом проблема стварања кратера експлозијом. Они полазе од чињенице да на величину кратера утичу параметри: енергија експлозије, материјал избачен експлозијом, дубина укопавања, густина експлозива и густина тла као и убрзање земљине теже у случају експлозија великих пуњења. Аутори користе и податке о кратерима са личног сајта *Holsapple*-а које користе за моделирање помоћу линеарне и кубне интерполације у програму MATLAB помоћу функције *griddata*. Они налазе да највећи утицај на димензије кратера имају дубина укопавања и густина тла (Hamlet, et.al., 2006; Fussner, et.al., 2006). О значају димензионе анализе и могућности примене у сложеним инжењерским проблемима какав је експлозија пишу и *Qin-yong* и *Mei-feng* (Qin-yong & Mei-feng, 2003). Многе студије које се тичу карактеристика кратера проузрокованих експлозијом односе се на димензиону анализу и статистику (Luccioni, et.al., 2009). У наведеним радовима углавном је реч о великим експлозивним пуњењима. У неким радовима утицај гравитације је узиман у обзир, а у неким не. Међутим, утицај контактне површине на карактеристике кратера није разматран ни у једном од радова.

5. ФОРМУЛИСАЊЕ МОДЕЛА ЗАВИСНОСТИ КАРАКТЕРИСТИКА КРАТЕРА ОД КАРАКТЕРИСТИКА ЕКСПЛОЗИВА И ПОДЛОГЕ НА БАЗИ ДИМЕНЗИОНАЛНЕ АНАЛИЗЕ ПРОБЛЕМА ПОВРШИНСКЕ ЕКСПЛОЗИЈЕ

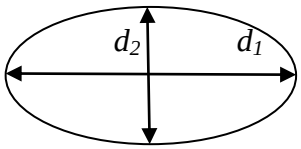
Када су у питању експлозије малих пуњења (вероватније је да ће терористи користити мање масе експлозива од оних коришћених при поменутим огледима, како због ограничених могућности ношења тако и због тога да та пуњења не буду много уочљива) може се занемарити ефекат гравитације у предложеном моделу. Наиме, утицај гравитације на формирање кратера испитиван је у многим студијама шездесетих година прошлог века, а где су експерименталним експлозијама у условима различитих вредности гравитације (од 1g колико је на површини Земље до 2,5g) активирана велика експлозивна пуњења (Moraski & Teal, 1965.). У случајевима површинских експлозија малих експлозивних пуњења (до 10kg) избацује се мало материјала подлоге и логично је да нема велике промене гравитације и да се она може занемарити.

Neuberger је у својим истраживањима такође приметио да гравитационе силе у већини проблема у вези са експлозијама могу бити занемарене (Neuberger, et.al., 2007). Многи аутори, међу којима и *Luccioni* и *Ambrosini* (Luccioni & Ambrosini, 2010), запажају да су најзначајније променљиве у дефинисању облика и димензија кратера маса експлозива и дубина укопавања пуњења. У случају површинске експлозије дубина укопавања једнака је нули, те се она у овом случају не узима у разматрање.

Вероватније је коришћење пуњења формираних од постојећих формацијских пуњења, то се у предложеном моделу одређивања узрока експлозије на основу кратера не разматра сферно већ пуњење цилиндричног и призматичног облика. У разматраним претходним истраживањима није узет у обзир утицај контактне површине пуњења и подлоге. У предложеном моделу разматра се кратер очишћен од вишка земље која се након разлетања вратила назад у кратер – тзв. стварни кратер (*true crater*). Димензије кратера усвојене су према *Cooper* – у (Cooper, 1997:422), приказане на сл. 10.



(а)



(б)

*Сл. 10. (а)*Изглед кратера; *(б)*Облик основе кратера, d_1иd_2 [m]–пречници основе кратера

Претпоставке од којих се пошло при изради модела:

- податак о врсти коришћеног експлозива на месту експлозије је познат (може се добити хемијском анализом[19] из узорака са дна и обода кратера);
- дубина укопавања екплозивног пуњења је једнака нули ($h=0$), тј. експлозив је иницран на површини подлоге (површинска експлозија);
- сила гравитације се занемарује (у раду се разматрају мала експлозивна пуњења);
- подлога је равна глатка површина;
- контактна површина експлозивног пуњења и подлоге је пројекција пуњења на раван подлоге (у случају цилиндричних пуњења контактна површина је круг-пројекција половине омотача у зависности од начина постављања пуњења на подлогу[20]. У случају пуњења облика четвотростране призме контактна површина је правоугаоник).

- сви кратери добијени површинском експлозијом су геометријски слични.
- величина кратера је исказана запремином кратера ($V_k[m^3]$) и зависи од променљивих: маса експлозива - $M_e[kg]$, топлота експлозије – Q_e $[J/kg]$, густина експлозива - $\rho_e[kg/m^3]$, густина тла - $\rho_{tla}[kg/m^3]$, контактна површина подлоге и експлозивног пуњења - $P_k[m^2]$.

[19] У Прилогу 1 су дати резултати хемијских анализа бризантних експлозива коришћених у експерименту, а којима се потврђује о којој врсти експлозива је реч у конкретној ситуацији.
[20] Теоретски, контактна површина је у овом случају једнака нули јер је идеално то линија која нема површину.

- решење проблема је дато димензионо хомогеним једначинама;
- запремина кратера је директно пропорционална маси експлозива, а обрнуто пропорционална густини подлоге (тло веће густине логично, пружаће већи отпор простирању експлозивног таласа), што се може написати у облику:

$V_k \sim M_e/\rho_{tla}$ ..... (25)

Множењем једначине (25) са леве и десне стране са ρ_{tla}/M_e добија се:

$V_k\, \rho_{tla}/M_e \sim 1$ .....(26)

Што се може написати у облику:

$V_k\, \rho_{tla}/M_e = const = \Pi$ ..... (27)

Ова функционална зависност између запремине кратера и променљивих које карактеришу почетне параметре одвијања експлозије може се проширити и зависношћу од карактеристика експлозива $\rho_e[kg/m^3]$ - густина експлозива и Q_e $[J/kg]$ - топлота експлозије. У разматрање нису узете карактеристике тла као што су граница лома и граница течења с обзиром да се у стручној литератури (Ambrosini & Luccioni, 2006; Luccioni, et.al. 2009) наводи да ове величине не утичу значајно на пречник кратера. Тако се функционална зависност запремине кратера и карактеристика експлозива и подлоге на којој је постављен може написати у облику:

$V_k = f_1(M_e, Q_e, \rho_e, \rho_{tla}, P_k)$ …… ..... (28)

где је: $V_k[m^3]$ – запремина кратера, $M_e[kg]$ - маса експлозива, $Q_e[J/kg]$ - топлота експлозије, ρ_e $[kg/m^3]$ - густина експлозива, ρ_{tla} $[kg/m^3]$ – густина подлоге, $P_k[m^2]$– контактна површина експлозива и подлоге. Ова једнакост разматра шест променљивих. Димензиона анализа подразумева примену SI система, у коме се димензије физичких величина могу изразити преко димензија масе (M), дужине (L) и времена (T). Према *Buckingham*-овој теореми у димензионој анализи сматра се да је једна једначина димензионо хомогена ако се може написати у облику $f(\pi_1, \pi_2, \ldots \pi_n)=0$, где је f функција од n променљивих бездимензионих величина (Giordano, et.al., 2003:307). Ова теорема се базира на могућношћу трансформације било које димензионо хомогене једначине, што подразумева дефинисање променљивих значајних за описивање испитиване појаве, а затим одређивање броја бездимензионих параметара у које се дефинисане промењиве морају груписати. Број бездимензионих група се одређује у *Buckingham*-овој теореми. Матрица која се формира од експонената основних димензионих величина које фигуришу у свакој променљивој је димензиона матрица. Ако постоји n

параметара који варирају у проблему и оне садрже *m* основних димензија (M, L, T, …), једначина која повезује све промењљиве ће имати *n - m* бездимензионих група. Он је означио те групе као π-групе. У конкретном примеру зависности запремине кратера, производ свих промењљивих је константна величина Димензије промењљивих дате су у Табели 8.

$V_k^a M_e^b Q_e^c \rho_e^d \rho_{tla}^e P_k^k = \Pi$ ..... *(29)*

Табела 8. Ознака, димензије и јединице промењљивих физичких величина (запремина кратера, маса експлозива, топлота експлозије, густина експлозива, густина тла, контактна површина)

Промењљива – физичка величина	***Запремина кратера***	***Маса експлозива***	***Топлота експлозије***	***Густина експлозива***	***Густина тла***	***Контакт. површина***
Ознака	V_k	M_e	Q_e	ρ_e	ρ_{tla}	P_k
Димензија	L^3	M	L^2T^{-2}	ML^{-3}	ML^{-3}	L^2
Јединица	m^3	Kg	Jkg^{-1}	kgm^{-3}	kgm^{-3}	m^2

Ако је производ промењљивих са одговарајућим експонентом константа, онда је производ димензија промењљивих са одговарајућим експонентом бездимензиона величина што даје систем од 3 једначине (за димензије *L, M, T*) са 6 непознатих (*a, b, c, d, e, k*).

$(L^3)^a.M^b.(L^2T^{-2})^c(ML^{-3})^d(ML^{-3})^e(L^2)^k=1, \Rightarrow L^{3a+2c-3d-3e+2k}T^{-2c}M^{b+d+e}=1,$ .....*(30)*

(L): 3a+2c-3d-3e+2k=0, 3(a-d-e)=-2k $\Rightarrow$ *k=-3 (a-d-e) /2*

(T):-2c=0 $\Rightarrow$ *c=0*

(M): b+d+e=0 $\Rightarrow$ *b=-d-e*

Ради решења овог неодређеног система, сматраћемо познатим величине *a, d, e* и уводимо претпоставке.

(1) за *d=1, a=e=0*$\Rightarrow$ *k=3/2, b=-1, c=0*

(2) за *e =1, a= d=0*$\Rightarrow$ *k=3/2, b=-1, c=0*

(3) за *a=1, d=e=0*$\Rightarrow$ *k=-3/2 , b=0, c=0*

Заменом добијених вредности константи у једначину (29) добијамо:

$V_k^0 M_e^{-1} Q_e^0 \rho_e^1 \rho_{tla}^0 P_k^{3/2} = \Pi_1$ ……..*(31)*

$V_k^0 M_e^{-1} Q_e^0 \rho_e^0 \rho_{tla}^1 P_k^{3/2} = \Pi_2$ .....*(32)*

$V_k^1 M_e^0 Q_e^0 \rho_e^0 \rho_{tla}^0 P_k^{-3/2} = \Pi_3$ .....*(33)*

Исто се може добити и матричним рачуном, полазећи од матрице (1):

$$\begin{bmatrix} 3 & 0 & 2 & -3 & -3 & 2 & | & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & | & 0 \end{bmatrix}$$ ……...матрица (1)

,

Даљим рачуном добијамо вредности за константе (бездимензионе величине) $П_1$,$П_2$, $П_3$.

$П_1 = M_e^{-1} \rho_e P_k^{3/2}$ .....(34)

$П_2 = M_e^{-1} \rho_{tla} P_k^{3/2}$ .....(35)

$П_3 = V_k P_k^{-3/2}$ .....(36)

Према *Buckingham*-овој теореми мора постојати нека функционална зависност f_1 између бездимензионих величина таква да је:

$f_2(П_1, П_2, П_3) = 0$ .....(37)

Заменом вредности бездимензионих величина добићемо:

$f_2(M_e^{-1} \rho_e P_k^{3/2}, M_e^{-1} \rho_{tla} P_k^{3/2}, V_k P_k^{-3/2}) = 0$ .. ..(38)

Како се запремина кратера V_k појављује само у једној од бездимензионих величина, то се једначина (38) може се написати као зависност једне променљиве од друге две

$V_k = P_k^{3/2} f(M_e^{-1} \rho_e P_k^{3/2}, M_e^{-1} \rho_{tla} P_k^{3/2})$ ..... (39)

$V_k = f(П_1, П_2)$ ….. (40)

где су независно променљиве:

$П_1 = \rho_e P_k^{3/2}/M_e$ …….....(41)

$П_2 = \rho_{tla} P_k^{3/2}/M_e$ .....(42)

Једначина (40) представља модел зависности запремине кратера од бездимензионих величина, а које су изражене преко карактеристика експлозива и услова експлозије – контактне површине. Овај модел је урађен на бази експерименталних података и представља ***емпиријски модел***.

Аналогно, може се извести зависност запремине кратера од контактне површине, масе коришћеног експлозива и густине тла у облику:

$V_k = f(P_k, M_e, \rho_{tla})$ ..... (43)

Димензије промењљивих у овом случају дате су у Табели 9.

Табела 9. Ознака, димензије и јединице промењљивих физичких величина (запремина кратера, маса експлозива, густина експлозива, контактна површина)

Промењљива – физичка величина	***Запремина кратера***	***Маса експлозива***	***Густина тла***	***Контактна површина***
Ознака	V_k	M_e	ρ_{tla}	P_k
Димензија	L^3	M	$M\,L^{-3}$	L^2
Јединица	m^3	kg	kgm^{-3}	m^2

$V_k^a\, P_k^b\, M_e^c\, \rho_{tla}^d = \pi$ .....*(44)*

$L^{3a}.L^{2b}M^cM^dL^{-3d}=1$ ..... *(45)*

$3a+2b-3d=0$

$c+d=0 \rightarrow d=-c,$

$3a+2b+3c=0$

За c=1, b=0 $\rightarrow a = d = -1$; за c=0, b=1 $\rightarrow a=-2/3$

$V_k^{-1} M_e\, \rho_{tla}^{-1} = \pi_1$ ..... (46)

$V_k^{-2/3} P_k = \pi_2$ ..... (47)

$f(\pi_1, \pi_2)=0$ ..... (48)

Уколико једну промењљиву изразимо преко друге добићемо модел зависности између запремине кратера, масе експлозива и контактне површине.

$V_k^{-1} M_e \rho_{tla}^{-1} = g(V_k^{-2/3} P_k)$ ..... (49)

Може се претпоставити да је ова зависност у облику линеарне (50) или степене (51) функције:

$\boldsymbol{V_k^{-1} M_e \rho_{tla}^{-1} = A + B V_k^{-2/3} P_k}$ ..... (50)

$\boldsymbol{V_k^{-1} M_e \rho_{tla}^{-1} = a(V_k^{-2/3} P_k)^b}$ ..... (51)

A,B,a,b – бездимензиони параметри који се могу наћи методом најмањих квадрата коришћењем експерименталних података

Предложене зависности биће дефинисане коришћењем експерименталних података површинских експлозија и апроксимацијом функције при чему дискретне тачке могу, али не морају да леже на кривој. Основна идеја одређивања апроксимационе функције заснива се на минимизирању девијација тачака од апроксимационог полинома уз претпоставку да су вредности независно променљиве тачне, а да девијација зависи од зависно променљиве.

6.ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА – МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД

У овом истраживању као један од метода научно истраживачког рада примењен је метод експерименталних испитивања. У циљу тестирања постављених хипотеза реализоване су експерименталне експлозије. Како сваки истраживачки пројекат захтева велики број података ради утврђивања међузависности низа утицајних фактора, поставља се питање колики је број експерименталних експлозија довољан за описивање појаве. За потребе овог истраживања вршене су експерименталне експлозије при којима је пуњење стављано на подлогу на различите начине у смислу различитих вредности контактних површина пуњења и подлоге, а за исту вредност масе експлозива. Како је промет и руковање експлозивом нормирано законски тј. држање и ношење експлозива може бити кривично дело, а сама експлозија, уколико није правилно организована и реализована, носи веома велике ризике по људске животе и имовину. Зато је организација експеримента веома сложена (захтева се специфичан полигон за испитивање који мора бити обезбеђен, прописно доношење експлозива на полигон, присуство медицинске и ватрогасне екипе, екипе противдиверзионе заштите са лиценцама за иницирање експлозива на полигону и сл.). Такође и из разлога економичности и заштите животне средине није урађен већи број експеримената. Како је у истим и сличним условима примећено слично понашање експлозива на одређеној подлози, то се може сматрати да је број извршених експерименталних експлозија довољан за извођење закључака.

У експериментима су врста експлозива (дефинисана густином и топлотом експлозије) и врста подлоге (дефинисана густином) сматране константним варијаблама, а маса експлозива и контактна површина променљивим варијаблама.

Главни кораци у извођењу експеримента су:

- да се обезбеди место експлозије - спречити недозвољена присуства и обезбедити медицинску и ватрогасну екипу за евентуално указивање помоћи;
- ангажовање лиценцираних минера за иницирање експлозија;
- обезбеђење и прописно руковање експлозивним материјалом (обавезно одвојено држање иницијалних средстава од главних експлозивних пуњења);

- карактеризација материјала подлоге;
- иницирање експлозија и снимање тока експлозије;
- детекција експлозива из кратера спот тест реакцијама;
- узорковање експлозива за хемијску анализу;
- чишћење кратера и проналажење трагова – делова експлозивне направе;
- мерење димензија кратера и
- фотографисање и скенирање кратера;

Како свако мерење садржи у себи грешку, то је изведено неколико експерименталних експлозија у истим условима (иста врста и маса експлозива, иста подлога и контактна површина експлозива и подлоге) и измерени су кратери на исти начин ради израчунавања грешке мерења, а које је табеларно приказано у Прилогу 3. Грешка мерења требало би да послужи за оцену добијених резултата.

6.1 Физичке карактеристике подлоге на којој су извођене експерименталне експлозије

Тлом се баве разне струке (геологија, минералогија, рударство, грађевина и др.) Тло је материјал који се у основи састоји од 3 фазе: чврста фаза (честице тла које се јављају у виду зрна и плочица разних величина, облика и минералошког састава), течна фаза и гасовита фаза. У понашању тла у смислу одговора на разна оптерећења одражавају се својства свих фаза као и њихове међусобне интеракције. Понашање таквог материјала је веома комплексно.

Основне карактеристике тла су густина честица, гранулометријски састав (расподела честица тла по величини), боја, облик и минералошки састав честица. Течна фаза у порама тла је готово увек вода. Иако су механичке карактеристике воде познате, њено понашање у ситним порама у тлу не мора увек одговарати класичној физици, јер долази до интеракције на молекуларном нивоу.[21] Иако тло има промењљиве карактеристике у реалним условима, одређена вредност густине сматрана је константном у свим експерименталним експлозијама. Одређивање густине подлоге вршено је класичним методима опште физике. (Максимовић, et.al., 1998)

[21] http://rgn.hr/~pkvasnic/MehanikaTla_2007.pdf , доступан 25.8.2011.

За потребе овог истраживања коришћене су подлоге од чисте земље и земље са каменчићима, подлога од бетона и подлога од асфалта.

Подлога од чисте земље била је браон боје, неугажена, необрађена, са мало траве без каменчића и других примеса, густине ρ_{tla}=1500kg/m^3. У примеру када је кратер 3Д скениран коришћена је растресита подлога од чисте земље густине ρ_{tla}=1300kg/m^3.

Карактеристике земље са каменчићима: густина чисте земље ρ_z=1440kg/m^3, величина и густина каменчића Ф(3÷5)cm, одн. ρ_k=2300kg/m^3. Вредности густина одређене су методом пикнометра и хидростатичке ваге. Масени удео каменчића у земљи је 40%, те је средња вредност густине тла ρ_{tla}=1784kg/m^3.

Бетонска подлога је чврста и компактна, без видљивих оштећења, дебљине 10cm и густине ρ_{tla}=1600kg/m^3 (одређено методом хидростатичке ваге).

Асфалт подразумева мешавину минералног агрегата дефинисане гранулације и битумена, при чему су сва зрна агрегата обавијена битуменом. (Суботић, 2002:22) Асфалтна подлога била је доброг квалитета, без видљивих оштећења у виду рупа, пукотина и сл. дебљине 8cm, ситнозрна (минерална зрна у асфалтној подлози су крупноће 15*$10^{-3}m$, ознака АВ16). Асфалт је добијен сабијањем већ припремљене смеше туцаника, минералног прашка и битумена као везива (око 5%). Дејство између везива и минералног материјала је фактор који одређује особине асфалта, а које су променљиве са температуром (на температури испод 0^oC асфалт се понаша као еластичан материјал, а изнад 0^oC као вискозан пластичан материјал). Сви експерименти рађени су у условима изнад 0^oC. Густина коришћеног асфалта је ρ_{tla}=2000kg/m^3, а одређена је методом хидростатичке ваге. Атмосферски услови (спољашња температура, ваздушни притисак, влажност ваздуха, правац и брзина ветра и др.) у данима испаљивања нису узимани у обзир с обзиром да на кратер - последицу бризантног дејства експлозије ови параметри немају битан утицај, за разлику од дејства ударног таласа, као ни вредности координата положаја полигона по географској дужини и ширини (вредност гравитације сматрана је константном).

6.2 Карактеристике експлозива и средстава за иницирање коришћених у експерименталним експлозијама

За потребе овог рада, у експерименталним експлозијама коришћена су експлозивна пуњења од војних бризантних експлозива ТНТ и пентрит, а за представника привредних изабран је експлозив на бази амонијум нитрата NH_4NO_3 - амонекс1. Карактеристике коришћених експлозива у експерименту дате су у Табели 10., фотографије неких експлозивних пуњења који су коришћени за експерименталне експлозије дате су на сликама 11-14, док су резултати хемијских анализа и стандарди дати дијаграмима у Прилогу 2. Тако је у Прилогу 2а дат резултат анализе узорка ТНТ са дна и обода кратера танкослојном хроматографијом, а стандарди ТНТ и пентрита дати у Прилогу 2б. Стандард ТНТ гасном хроматографијом дат је у Прилогу 2в. У Прилогу 2д дат је резултат анализе узорака ТНТ масеном спектрометријом, док је у Прилогу 2г дат стандард ТНТ – инфрацрвени спектрограм. У Прилогу 2ђ дат је стандард амонијум нитрата као обавезне компоненте у експлозиву амонекс1 и то његов инфрацрвени спектрограм, а стандард пентрита испитиван инфрацрвеном спектрофотометријом дат је у Прилогу 2е.

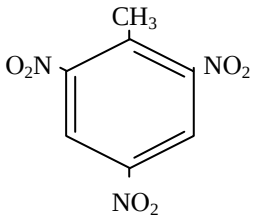
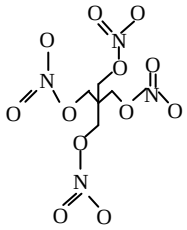
ТНТ као карактеристични војни бризантни експлозив је једињење које кристалише у облику љуспица бледо-жуте боје ромбоедарског облика, нехигроскопан, стабилан и неосетљив на удар и трење. (Поштић, et.al., 1998) Он је молекулски експлозив. Као експлозивно пуњење за потребе овог експеримента коришћени су стандардни тротилски меци од 0,1*kg*, 0,2*kg* и њихове комбинације добијене сечењем и спајањем. Стандардни тротилски метак масе 0,1*kg* је ваљкастог облика, димензија ∅33x108*mm*, призматичног облика димензија 100x25x25*mm* док је ТНТ пуњење масе 0,2*kg* димензија 100x50x25*mm*. Сваки тротилски метак који је коришћен у експерименту поседовао је отвор за постављање детонаторске каписле ДК-8 као упресовано бакелитно лежиште у функцији носача упаљачког механизма са навојем М10x1.

Пентрит је ултрабризантни експлозив у виду тестасте масе жућкасто-беле боје. Мана овог експлозива је осетљивост на удар и трење што се ублажава додатком флегматизатора приликом производње. Пентритске патроне се израђују у димензијама 150x60x40*mm* и умотане су у парафински папир. Тако је за потребе овог експеримента коришћен пластични експлозив на бази пентрита а који је смеша високобризантног

експлозива пентрита и полиуретанског везива (ознака PEP – 500) стандардно паковање - масе 0,5*kg* , а припремљена су и експлозивна пуњења масе од 0,05*kg*, 0,1*kg*, 0,125*kg*, 0,15*kg*, 0,2*kg*, 0,25*kg*, 0,5kg и 1*kg*.

Амонекс-1 (амонекс појачани) је прашкасти амонијумнитратни експлозив, који представља експлозивну смешу опште намене (амонијум-нитрат NH_4NO_3 – 45%, TNT – 30%, дрвено брашно – 2% и алуминијум *Al* – 23%). Ова врста експлозива припада групи АНФО (*Amonium Nitrat Fuel Oil*) и неотпорна је на утицај воде. За потребе експерименталних експлозија коришћена су оригинална паковања од 1k*g* и припремљене патроне масе 0,090*kg*, 0,100*kg*, 0,200*kg*, 0,250*kg*, 0,500*kg*, 1,5*kg*, 2 *kg* и 9*kg*.

Табела 10. Карактеристике експлозива[22] коришћених у експерименту:

Р.бр.	**Карактеристика експлозива**	**TNT**	**PETN**	**Амонекс1**
1	Хемијска формула	$C_6H_2(NO_2)_3CH_3$	$C(CH_2ONO_2)_4$	
2	Структурна формула			- -
3	Молекулска маса	227	316	-
4	Густина ρ_e [kg/m^3]	1600	1760	1060
5	Биланс кисеоника [%]	-73,9	-10,1	0,24
6	Брзина детонације [*m/s*]	6900	8400	4200
7	Топлота експлозије Q_e[*kJ/kg*]	4310	5860	4248
8	Температура експлозије [°*K*]	3370	4500	2450
9	Температура дефлаграције [°*C*]	300	210	248

Од средстава за иницирање експлозива у експериментима је коришћен обичан спорогорећи штапин, који је заједно са детонаторском капислом (ознака DK-8)

[22]За формирање табеле коришћени су подаци из следећих извора: Мићић Р. (1992), Експлозивне материје-технички приручник, Београд, Институт Безбедности, Jaramaz, S. (1997) Physics of explosion, University of Belgrade, Mechanical Engineering Faculty, Belgrade и интернет странице http://chemistry.about.com/od/factsstructures/ig/Chemical-Structures---T/Trinitrotoluene-or-TNT.htm и http://chemistry.about.com/od/factsstructures/ig/Chemical-Structures---P/PETN.htm доступне 12.4.2012.

послужио за израду спорогорећег упаљача на лицу места. Такође, за иницирање експлозива коришћена је и тренутна електрична детонаторска каписла. Фотографије средстава за иницирање која су коришћена у експерименту дате су на сликама 15 - 18.

6.3 Карактеристике осталих уређаја коришћених у експериментима

За тренутно доказивање присуства – детекцију експлозива на лицу места коришћен је комплет тестова произвођача "MISTRAL GROUP" (сл. 28 и 29). У несесеру је запакован *Expray*® тест са три аеросол спреја, колекција малих папира и једно постоље са верификацију (доказ да спреј садржи активне реагенсе и за демонстрацију да се појављује позитивна реакција на RDX). Примена овог теста убрзава форензичку анализу експлозије пошто се на резултате хемијске анализе у форензичкој лабораторији дуго чека. Ови тестови су врло једноставни за коришћење и могу се употребљавати у свим временским условима. Узорци експлозива за тренутно доказивање на месту експлозије узимају се тако што се папирићем натапка површина обода и дна кратера, након чега се папир напрска одговарајућим реагенсом и појављује се моментална бојена реакција карактеристична за једну врсту експлозива. Овим тестом може се детектовати присуство експлозива групе А(TNT,TNB и сл.), групе Б (SemtexH, RDX, C4, и сл.) и групе компонената које садрже неорганске нитрате (ANFO и сл.). Овај тест детектује врло мале масе експлозива (чак до 20*ng*).

За одређивање запремине кратера коришћен је конвенционални метод мерења димензије кратера – примена мерних трака и апроксимација кратера купом, метод изливања кратера алабастер гипсом и метод 3Д скенирања. Опрему за скенирање 3Д скенером чине: скенер, преносни рачунар, мрежа са маркерима и струјни агрегат. Основне техничке карактеристике скенера *ZScanner700* коришћеног у експерименту су: маса 0.98*kg*, димензије 160x260x210*mm*, брзина скенирања 18000тачака/*sec*, XY прецизност - 50μ, резолуција -0.1*mm*[23]. Припрема скенера за рад подразумева покретање тзв. „*Plug-and-play setup*". Током скенирања, на екрану рачунара се приказује слика површине која се скенира потпуно уклопљена у реалном времену, чинећи једноставним сазнање када је наступио тренутак у ком су сви подаци обухваћени тј. када је скенирање завршено. Програм скенера *ZScan* производи „*STL fajl*" који је спреман за штампање на 3Д штампачу, који може направити физички

[23] http://www.zcorp.com/documents/688_ZScannerBrochUS%20Single%20page%20setup.pdf доступ:1.6.`11.

прототип за неколико сати. Кратер, као и сваки објекат који се скенира, има јединствену позицију - *X Y Z* координате које скенеру омогућавају да препозна где је одређена тачка повезана са другим тачкама. Резолуција скенера који се тренутно налазе на тржишту је (0.1-0.05)*mm*. Сви скенери се испоручују у комплету са *ZScan* софтвером који служи за комуникацију скенера и рачунара, као и да омогући сва подешавања неопходна за скенирање и одређене манипулације са скенираним подацима. За каснију детаљнију обраду скенираних података потребан је додатни софтвер, а светски стандард представљају софтвери *Geomagic* и *Rapidform* као заокружена решења за комплетну обраду скенираних података. Изглед коришћеног скенера и њиме снимљеног кратера након експлозије ТНТ на подлози од растресите земље дат је на сликама 34-42.

Такође, паралелно са стандардном форензичком обрадом места експлозије, извршено је снимање кратера у инфрацрвеном опсегу таласних дужина инфрацрвеном камером – *FLIR, Infracam Wester*, а која је приказана на сл. 41.

6.4 Ток и резултати експеримента

Експерименталне експлозије извршене су на вежбовним полигонима: у наставном центру МУП РС Митрово поље, полигону САЈ МУП РС у Батајници и војном полигону у Бубањ Потоку. Одабрано експлозивно пуњење дефинисане масе и геометрије постављано је на одговарајућу подлогу на два начина: хоризонтално (дужа оса симетрије је паралелна са подлогом) и вертикално (дужа оса симетрије је нормална на подлогу) у циљу остваривања различитих вредности контактних површина.

Експлозив је иницран штапински (коришћењем детонаторске каписле DK-8 и 0.30*m* спорогорећег штапина који је припаљен помоћу обичне шибице) и електрично (помоћу електричне детонаторске каписле и извора електричне струје). Ток експеримента одн. тренутак експлозије приказан је на сл. 23. и 24. Најпре је засецан спорогорећи штапин на дрвеној подлози под угловима од 45º и 90º у односу на уздужну осу штапина. Спајањем детонаторске каписле и штапина прављен је спорогорећи упаљач (крај сечен под углом 90º спајан је минерским кљештима са детонаторском капислом док је други крај служио за паљење). Дужина штапина дефинише време за које ће експлозив бити иницран и могућност склањања присутних у заклон. Приликом извођења експерименталних експлозија водило се рачуна о томе да места на која су постављана

експлозивна пуњења буду на удаљењу од минимум пет метара како ефекти експлозије услед претходних испаљивања не би утицали на облик и димензије кратера. Након површинских експлозија, на подлогама су настала видљива оштећења у виду кратера, који су детаљно прегледани, очишћени од разбијене и урушене подлоге и измерени. Изглед оштећења на земљаној подлози проузрокованог дејством површинске експлозије у виду стварног кратера и мерење његових димензија приказани су на сл. 26. и 27. Мерене су димензије у основи кратера (растојања између најистуренијих тачака – дужина, ширина) и највећа дубина кратера као што је приказано на сл.10. Добијени резултати експерименталних испитивања приказани су табеларно са изгледом коришћеног експлозивног пуњења (дате вредности димензија и масе), начином постављања, местом иницирања (означено стрелицом), ефектима експлозије у виду кратера чије су карактеристике – дужина, ширина и дубина измерене а запремина израчуната. Запремина кратера рачуната је апроксимацијом запремине кратера запремином купе са основом елипсе ($V_k=d_1d_2h\pi/12$, где су $d_1[m]$ и $d_2[m]$ пречници основе кратера, а $h[m]$ дубина кратера). Стандардна процедура форензичке обраде кратера подразумева фотографисање кратера уз постављање мерне траке у нивоу основе кратера како би се директно са фотографија могла одредити величина кратера. Кратер је снимљен и инфрацрвеном камером непосредно након испаљивања, као и неколико минута након испаљивања сл.(42-46), а ради лоцирања топлијег поља, који би евентуално указивао на положај места иницирања и време експлозије и евентуалног одређивања времена експлозије на основу промене температуре тла у кратеру.



*Сл. 11.*Изглед ТНТ пуњења



*Сл. 12.*Изглед ТНТ пуњења



Сл.13. Паковање пентрита (ПЕП-500)



Сл.14. Изглед пуњења Амонекс1



Сл.15. Детонатор



Сл.16. Израда спорогорећег упаљача



Сл.17. Спорогорећи упаљач



Сл.18. Тренутни електрични детонатори



*Сл. 19.*Припрема пуњења – сечење експлозива



*Сл.20.*Припрема пуњења – спајање пуњења



Сл.21. Штапинско иницирање експлозива



*Сл.22.*Електрично иницирање експлозива



Сл. 23. Тренутак експлозије амонекса1



Сл. 24. Тренутак експлозије ТНТ



Сл. 25. Форензичка обрада места експлозије



Сл. 26. Мерење дубине кратера



Сл. 27. Мерење пречника кратера



*Сл.28.*Узорковање земљишта из кратера



Сл. 29. Спрејеви за детекцију експлозива



Сл. 30. Детекција експлозива



Сл.31. Преглед унутрашњости кратера



Сл. 32. Изливање кратера гипсом



Сл. 33. Одливак кратера



Сл. 34. Ручни 3Д скенер – *ZScan700*



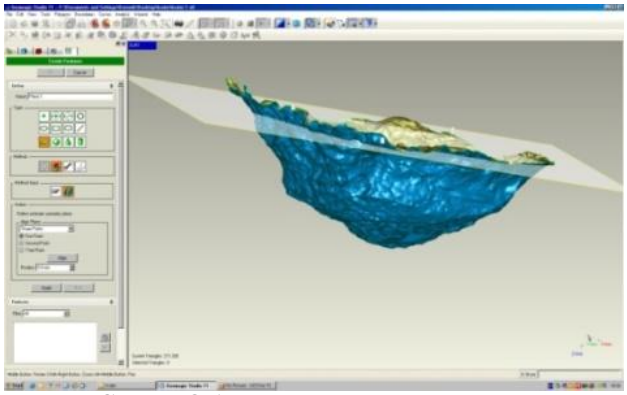
Сл. 35. Припрема скенера



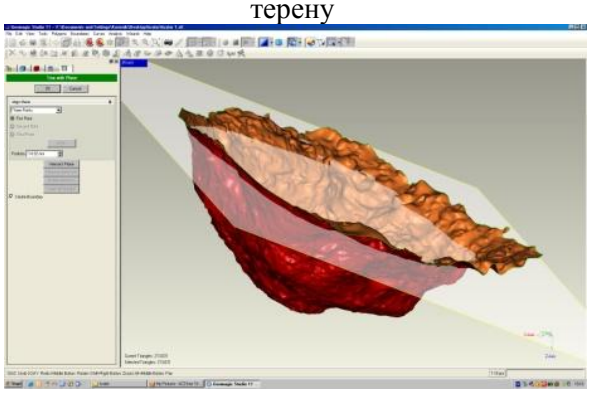
Сл. 36. Поступак скенирања кратера



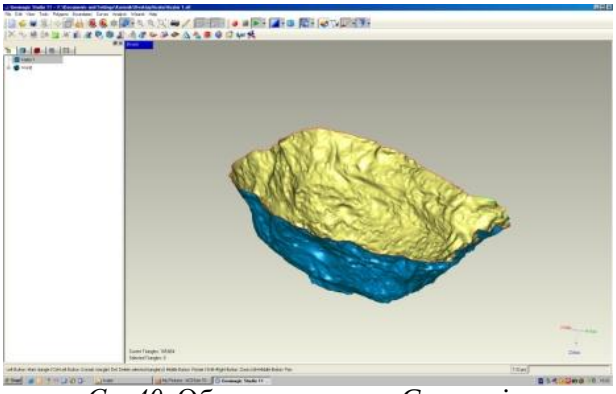
Сл. 37. Обрада скенираног документа на терену



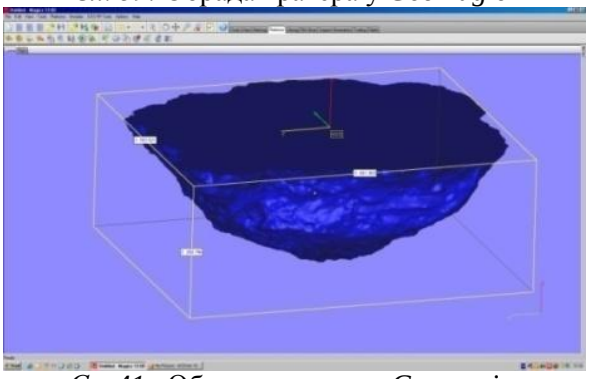
Сл.38. Обрада кратера у *Geomagic*



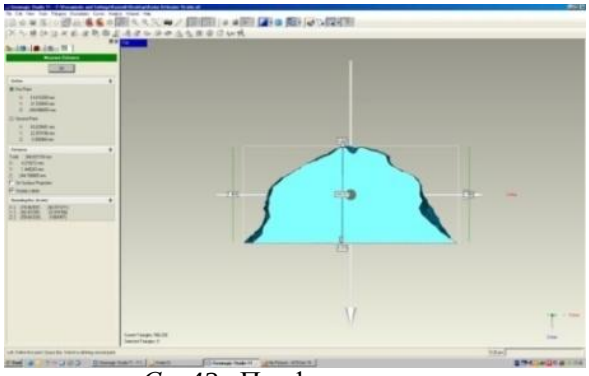
Сл. 39. Обрада кратера у *Geomagic*



Сл. 40. Обрада кратера у *Geomagic*



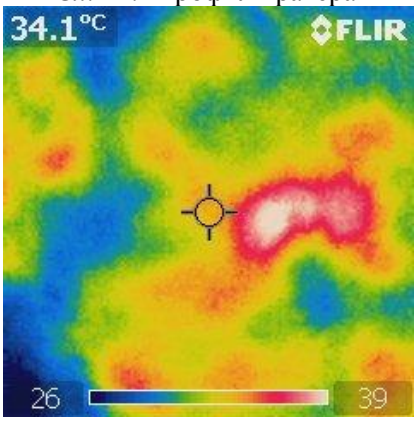
Сл. 41. Обрада кратера у *Geomagic*



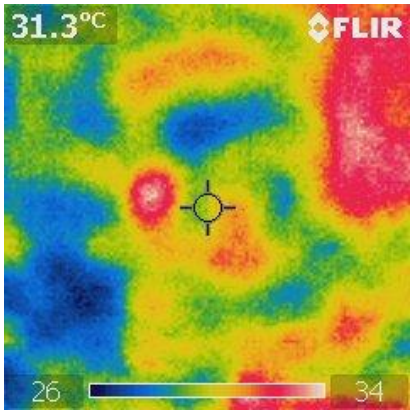
Сл. 42. Профил кратера



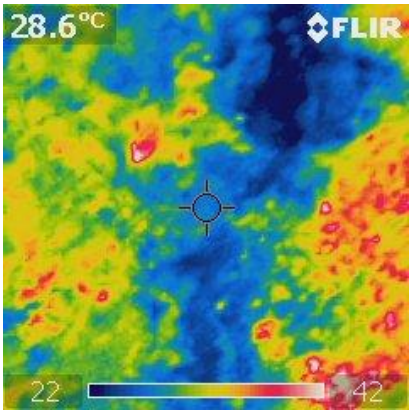
Сл. 43. ИЦ камера коришћена за снимање кратера



Сл. 44. ИЦ снимак кратера након 10s



Сл. 45. ИЦ снимак кратера након 60s



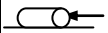
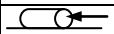
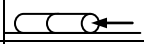
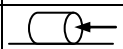
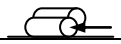
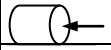
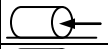
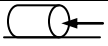
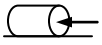
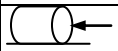
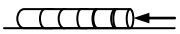
Сл.46. ИЦ снимак кратера након 12мин.

Извршено је изливање унутрашњости једног кратера алабастер гипсом да би се касније на основу одливка одредила запремина потапањем одливка у воду и одређивања запремином истиснуте течности. На истом примеру извршено је и скенирање кратера 3Д скенером - *ZScan700* са припадајућим софтверима *ZScan* и *Geomagic Studio* и одређена је запремина кратера у програму као и апроксимацијом запремине кратера запремином купе са основом елипсе. Након одређивања све три вредности запремине једног кратера извршено је поређење у циљу упоређивања метода. На примеру једног кратера, насталог површинском експлозијом на растреситој земљи, дат је упоредни преглед до сада коришћених начина добијања запремине кратера (апроксимација кратера купом са основом круга/елипсе са мереним пречницима основе и висином, изливање кратера гипсом и мерење запремине одливка и 3Д скенирањем кратера).

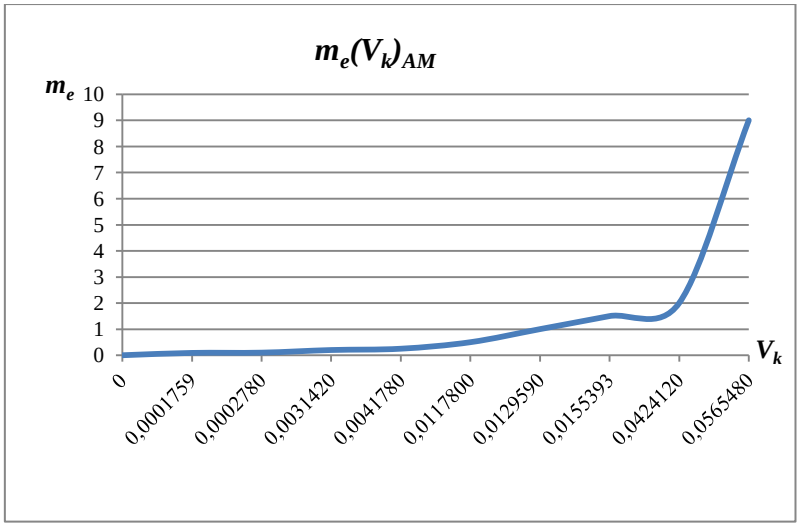
Циљ овог рада је моделирање карактеристика кратера при површинској експлозији бризантног експлозива, те се најпре пошло од експерименталних података и израде емпиријског модела на основу њих. Процењена је крива која би најбоље описивала појаву површинске експлозије одн. зависност масе експлозива и запремине кратера. У циљу израде прецизнијег модела одн. дефинисање релације између карактеристика кратера, карактеристика тла и масе експлозива разматран је облик функционалне зависности преко тачака добијених експерименталним путем. С обзиром да је примећено да иста маса и геометрија пуњења у случају различитог начина постављања експлозивног пуњења дају различите вредности запремине кратера, то су дати и дијаграми зависности запремине кратера од контактне површине $V_k(P_k)$ у *Excel.* Како је тешко нацртати криву која ће за исту вредност масе експлозива имати више вредности запремине кратера, а које се добијају окретањем експлозивног пуњења и остваривањем више вредности контактних површина, то су за апроксимацију кривих биране

вредности једне масе експлозива којој одговара једна запремина кратера с обзиром на начин постављања. Облик функционалне зависности урађен на основу експерименталних података уређених парова масе експлозива и запремине кратера направљен је у *Excel*-у. У Табели 11. приказани су резултати експлозија амонекса1 на земљи - вредности димензија и запремине кратера као његових карактеристика, а на сл.47. и 48. дате су зависности масе експлозива од запремине кратера одн. запремине кратера од контактне површине. У Табели 12 дати су резултати експерименталних експлозија ТНТ на земљи, на сл. 49. и сл. 50. зависности масе експлозива од запремине кратера за хоризонтално одн. вертикално постављена пуњења ТНТ на земљу, а зависност запремине кратера од површине контакта експлозива и подлоге дата је на сл. 51.

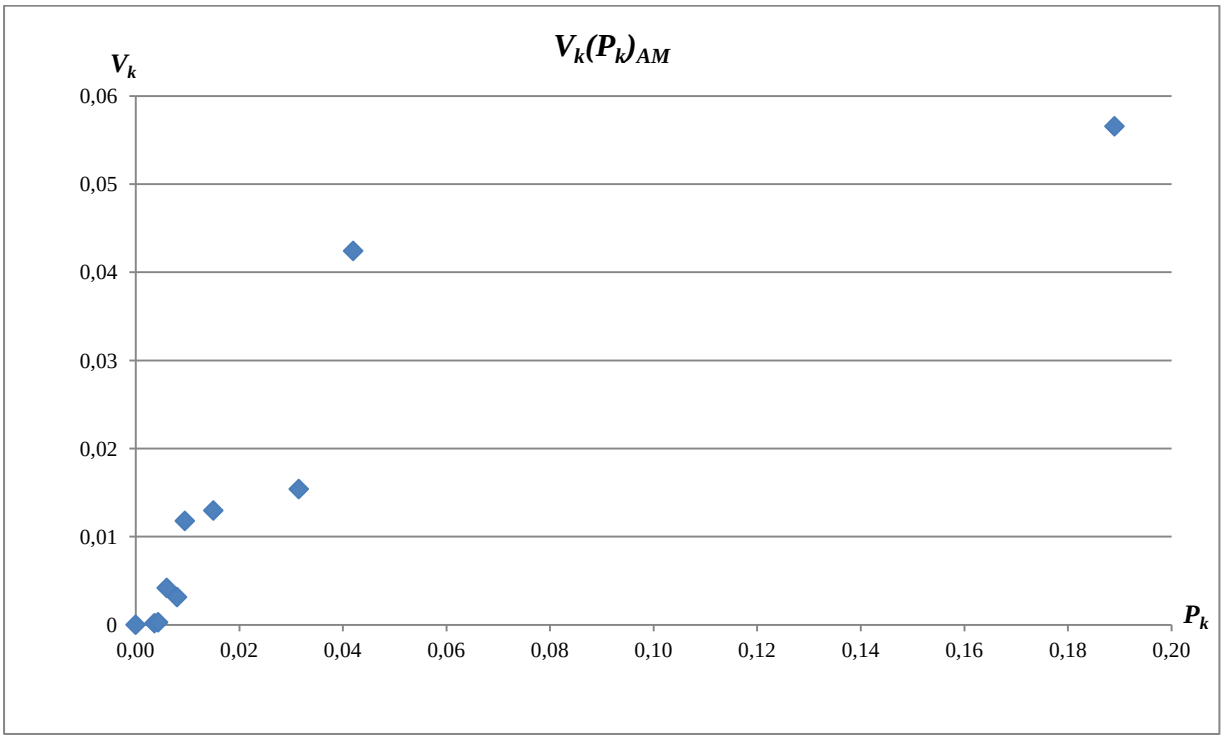
Табела 11. Резултати експерименталних површинских експлозија амонекса1 на земљи

Р. бр.	***Маса [kg]***	***димензије [m] експлозива***	***Начин пост. и иницир.***	***Конт.пов. Pk[m^2]***	***Димензије [m] кратера d_1 x d_2 x h***	***Запр.кратер a∇[m^3]***
1	0	0	-	0	0	0
2	0,09	Ф0,028x0,13		0.00364	0,16x0,12x0,03	0.0001759
3	0,1	Ф0,028x0,155		0.00434	0,19x0,16x0,035	0.0002780
4	0,2*	2(Ф0,028x0,155)		0.00868	0,4x0,18x0,06	0.0011310
5	0,2	Ф0.032x0.250		0.008	0,4x0,3x0,1	0.0031420
6	0,2*	2(Ф0,028x0,155)		0.00868	0,33x0,3x0,12	0.0031100
7	0,25	Ф0.060 x0.100		0.006	0,38x0,35x0,12	0.0041780
8	0,5	Ф0.050 x0.190		0.0095	0,5x0,55x0,18	0.0117800
9	1	Ф0.060 x0.250		0.015	0,6x0,55x0,15	0,0129590
10	1 *	Ф0.070 x0.300		0.021	0,4x0,3x0,18	0,0056550
11	1,5	Ф0.070 x0.450		0.0315	0,7x0,7x0,12	0,0153930
12	2	2(Ф 0.070 x0.300)		0.042	1x0,9x0,18	0,0424120
13	9	6(Ф 0.070 x0.450)		0.189	2,40x0,90x0,10	0,0565480

(*приликом апроксимације криве ове вредности нису разматране)

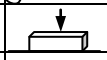
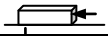
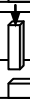
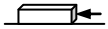
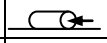


Сл. 47. Зависност масе експлозива m_e од запремине кратера V_k (експлозија амонекса1 на земљи)

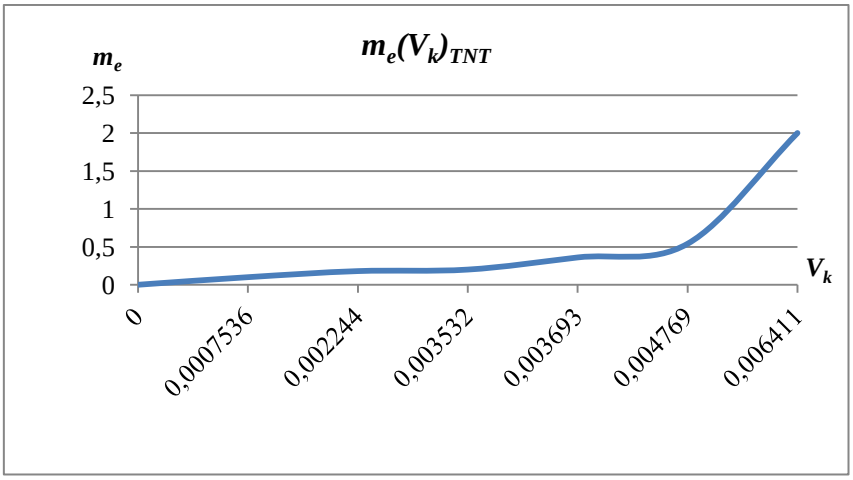


Сл. 48. Зависност запремине кратера V_k од контактне површине P_k (експлозија амонекса1 на земљи)

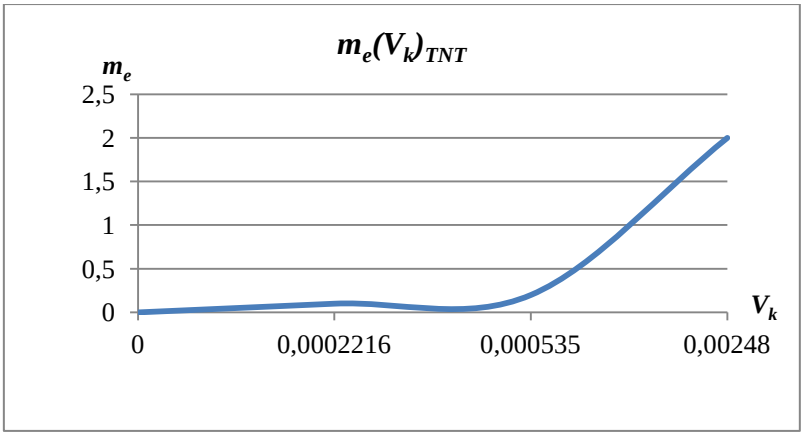
Табела 12. Резултати експерименталних експлозија војног експлозива ТНТ на земљи

Р. бр.	***Маса [kg]***	***димензије [m] експлозива***	***Начин пост. и иницир.***	***Конт.пов рш.Pk[m^2]***	***Димензије [m] кратера d_1 x d_2 x h***	***Запр.кратера V[m^3]***
1	0	0	-	0	0	0
2	0,1	Ф0.033x0.108		0.003564	0.20x0.18x0.08	0.0007536
3	0,1 *	Ф0.033x0.108		0.00085	0.11x0.11x0.07	0.0002216
4	0,1 *	Ф0.033x0.108		0,00252	0,19 x0,17 x0,07	0,0005920
5	0,18	0.1x0.09x0.02		0.009	0.35x0.35x0.07	0.0022440
6	0,2*	0.1x0.05x0.025		0.005	0.40x0.26x0.13	0.0035380
7	0,2 *	0.05x0.025x 0.1		0.00125	0.16x0.16x0.08	0.0005350
8	0,2	0.1x0.025x0.05		0.0025	0.30x0.30x0.15	0.0035320
9	0,36	2(0.1x0.09x0.02)		0.009	0.42x0.42x0.08	0.0036930
10	0,54	3(0.1x0.09x0.02)		0.009	0.45x0.45x0.09	0.0047690
11	0,54*	3(0.1x0.09x0.02)		0.027	0.55x0.55x0.06	0.0047490
12	2	Ф0.07x0.3		0.021	0.50x0.35x0.14	0.0064110
13	2*	Ф0.07x0.3		0.00385	0.27x0.27x0.13	0.0024800

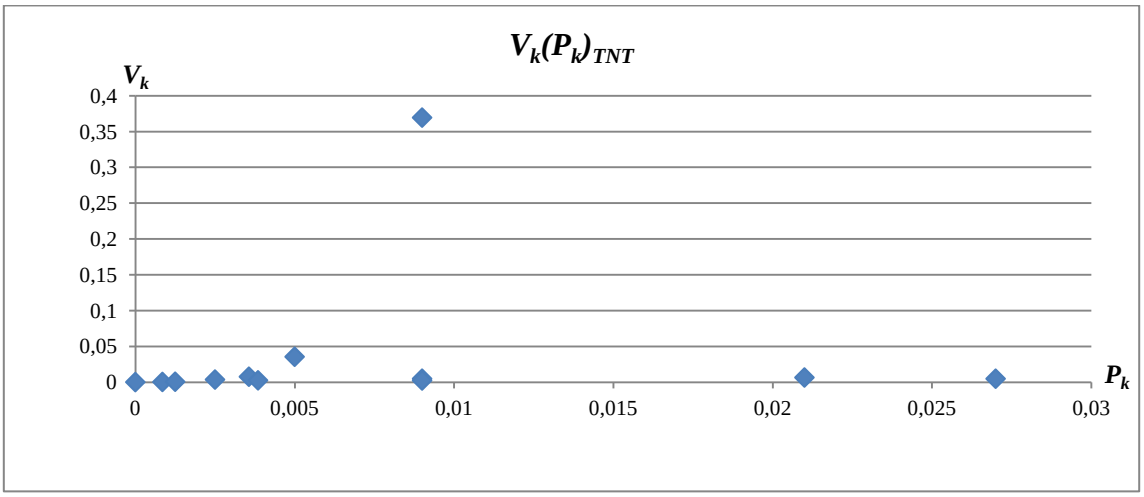
(*приликом апроксимације криве на сл.49 ове вредности нису разматране)



Сл. 49. Зависност масе експлозива m_e од запремине кратера V_k (експлозија хоризонт. постављеног ТНТ на земљу)



Сл.50. Зависност масе експлозива m_e од запремине кратера V_k (експлозија вертикално постављеног ТНТ на земљу)



Сл. 51. Зависност запремине кратераV_k и контактне површинеP_k-експлозија ТНТ земља

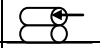
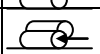
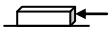
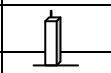
У Табели 13. дат је упоредни приказ одређивања запремине кратера на три начина: кратер апроксимиран купом, мерење запремине одливка кратера и 3Д скенирање кратера, при површинској експлозији ТНТ на растреситој земљи (ρ_{tla}=1300kg/m^3).

Табела 13. Упоредни приказ одређивања запремине кратера апроксимацијом купом, израдом одливка и мерењем његове запремине и 3Д скенирањем

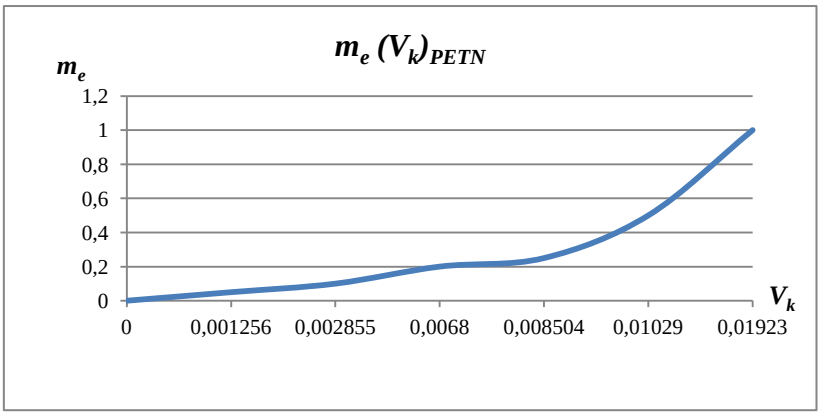
Маса[kg]	***димензије експлоз.[m]***	***Нач. пост. и иницир.***	***Конт пов.Pk[m^2]***	***Дим. крат [m]d_1x$d_2$xh***	***Запр.крат-апр.куп.V[m^3]***	***Запр.крат – излив V[m^3]***	***Запр.кра–3Дскен.V[m^3]***
0,1	Ф0.033x0.108		0.003564	0.6x0.6x0.35	0.032968	0.035113	0.036449

Резултати експлозија пентрита на земљи су у Табели 14., зависност масе експлозива од запремине кратера на сл.52 и запремине кратера од контактне површине на сл.53.

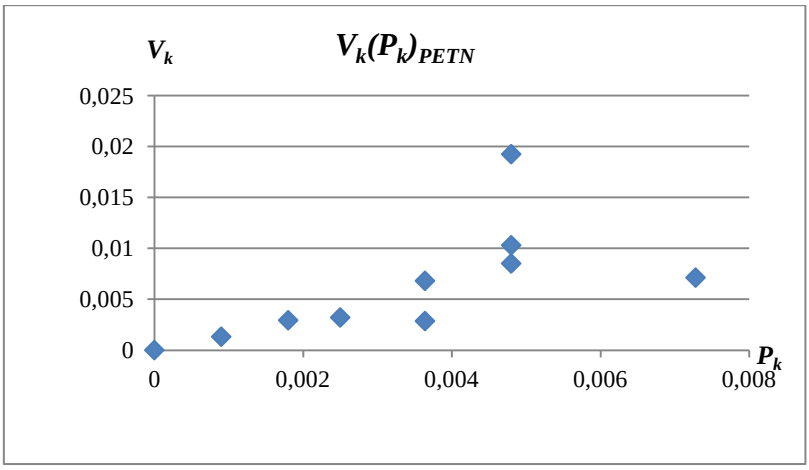
Табела 14. Резултати експерименталних експлозија пентрита на земљи

Р. бр.	***Маса [kg]***	***димензије [m] експлозива***	***Начин пост. и иницир.***	***Конт.повр ш.Pk[m^2]***	***Димензије [m] кратера d_1 x d_2 x h***	***Запр.крате ра V[m^3]***
1	0	0	-	0	0	0
2	0,05	0.03x0.03x0.03		0.0009	0.24x0.20x0.10	0.001256
3	0,1	Φ0.028x0.130		0.00364	0.32x0.31x0.11	0.002855
4	0,1 *	0.021x 0.021x0.125		0.0026	0.35x0.35x0.10	0.003205
5	0,2	2x(Φ0.028x0.130)		0.00364	0.50x0.40x0.13	0.0068
6	0,2 *	2x(Φ0.028x0.130)		0.00728	0.40x0.40x0.17	0.007117
7	0,25	0.08x0.06x0.03		0.0048	0.50x0.50x0.13	0.008504
8	0,25 *	0.06x0.03 x 0.08		0.0018	0.40x0.40x0.07	0.00293
9	0,5	0.08x0.060x0.060		0.0048	0.55x0.55x0.13	0,01029
10	1	0.08x0.060x0.120		0.0048	0.70x0.70x0.15	0,01923

(*приликом апроксимације криве на сл. 52 ове вредности нису разматране)



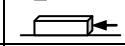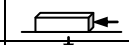
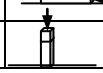
Сл. 52. Зависност масе експлозива m_e од запремине кратера V_k - пентрит на земљи



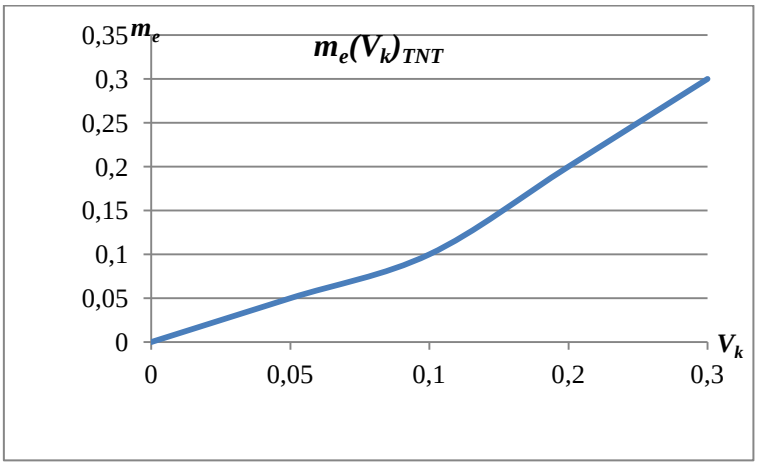
Сл. 53. Зависност запремине кратера V_k од контактне површине P_k - експлозија пентрита на земљи

У случају експлозије ТНТ и пентрита на земљи са каменчићима резултати експеримената дати су у Табелама 15. и 16, док су експерименталне зависности масе експлозива од запремине кратера и зависност запремине кратера од контактне површине дате на сл. 54., сл. 55. и сл. 56. Експериментални подаци површинских експлозија на бетону приказани су у Табели 17. У случају експлозије амонекса1 на бетону на сл. 57. приказана је зависност масе коришћеног експлозива од запремине кратера док је на сл. 58. приказана је зависност запремине кратера од контактне површине. На сликама 59. и 60. приказана је експериментално добијена зависност масе коришћеног експлозива m_e и запремине кратера V_k, одн. запремине кратера V_k од контактне површине P_k при експлозији ТНТ на бетону.

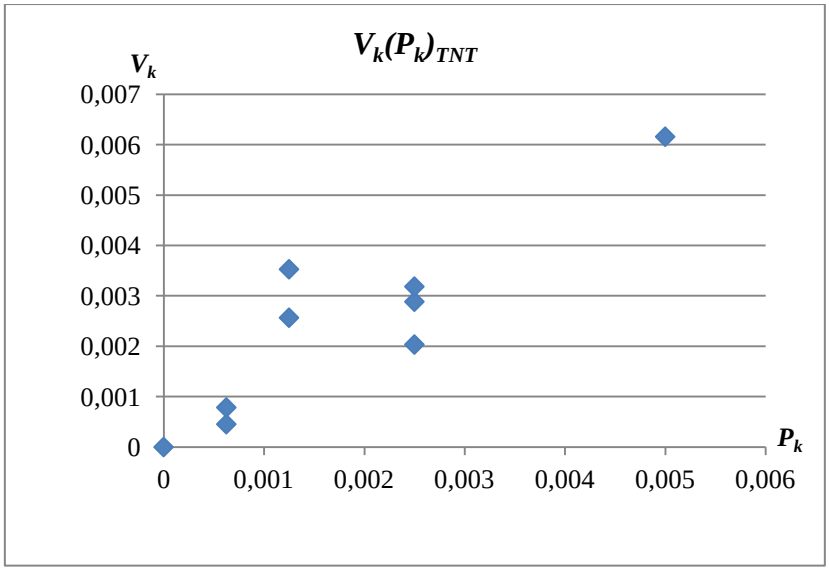
Табела 15. Резултати експерименталних експлозија ТНТ на земљи са каменчићима

Р. бр.	***Маса [kg]***	***димензије [m] експлозива***	***Начин пост. и иницир.***	***Конт.површ.Pk[m^2]***	***Димензије [m] кратера d_1 x d_2 x h***	***Запр.кратера aV[m^3]***
1	0	0	-	0	0	0
2	0,05	0.025x0.025x0.05		0.000625	0.17x0.17x0.06	0.00045396
3	0,1	0.025x0.025x0.1		0.000625	0.20x0.20x0.075	0.00078539
4	0,1*	0.1x0.025x0.025		0.0025	0.37x0.30x0.07	0.00203418
5	0,1*	0.05x0.025x0.05		0.00125	0.35x0.35x0.08	0.00256563
6	0,2 *	0.1x0.05x 0.025		0.005	0.40x0.42x0.14	0.00615752
7	0,2	0.05x0.025x0.1		0.00125	0.36x0.36x0.085	0.00288398
8	0,2*	0.1x0.025x0.05		0.0025	0.38x0.40x0.08	0.00318348
9	0,3	0.05x0.025x0.15		0.00125	0.35x0.35x0.11	0.00352774

(*приликом апроксимације криве на сл. 54 ове вредности нису разматране)



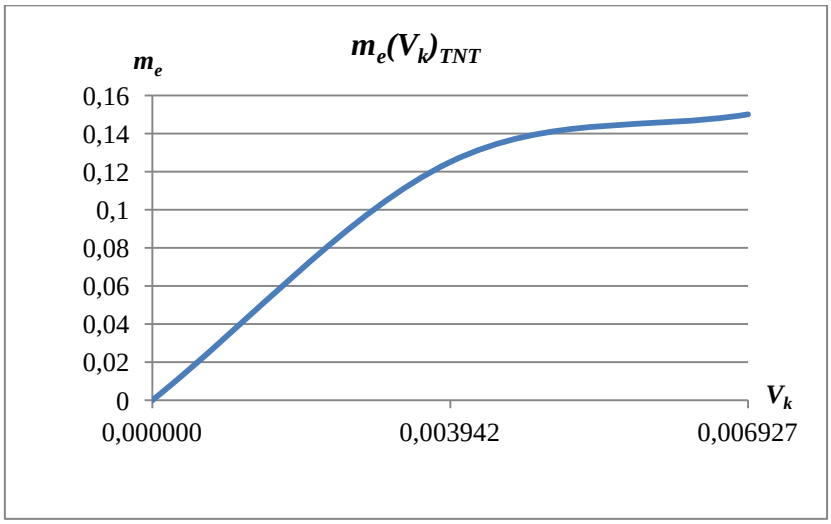
Сл. 54. Зависност масе експлозива m_e од запремине кратера V_k - експлозија ТНТ на земљи са каменчићима (усправно постављено пуњење)



Сл. 55. Зависност запремине кратера V_k од контактне површине P_k - експлозија ТНТ на земљи са каменчићима

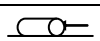
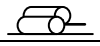
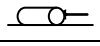
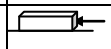
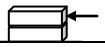
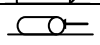
Табела 16. Резултати експерименталних експлозија пентрита на земљи са каменчићима

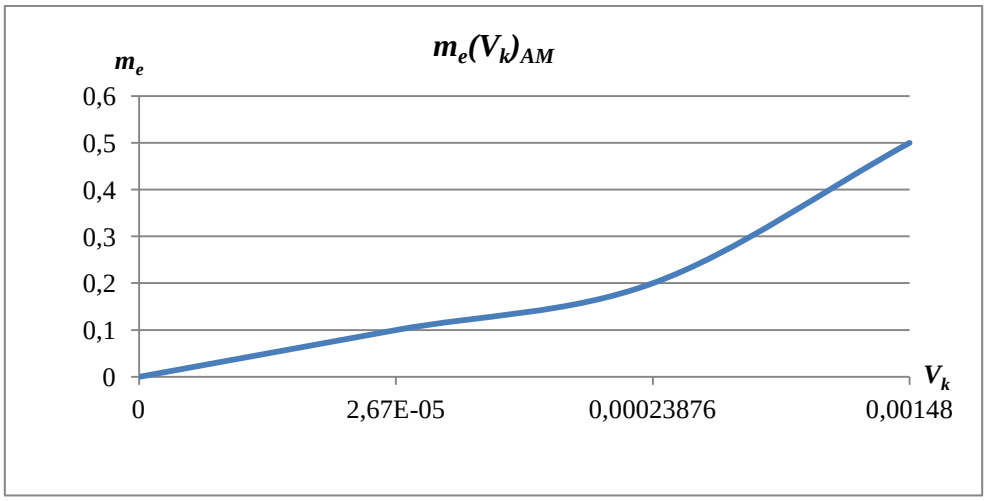
Р. бр.	***Маса [kg]***	***димензије [m] експлозива***	***Начин пост. и иницир.***	***Конт.површ.Pk[m^2]***	***Димензије [m] кратера d_1 x d_2 x h***	***Запр.кратера V[m^3]***
1	0	0	-	0	0	0
2	0,125	0,035x0,04x0,05		0,0014	0,37x0,37x0,11	0,00394243
3	0,150	0,045x0,04x0,05		0,0018	0,42x0,42x0,15	0,00692721



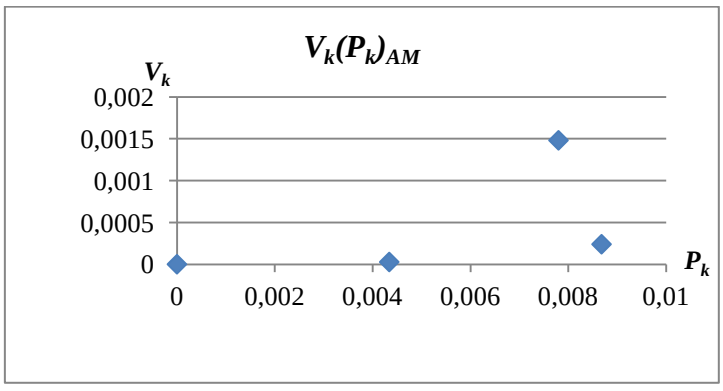
Сл. 56. Зависност масе експлозива m_e од запремине кратера V_k - површинска експлозија пентрита на земљи са каменчићима

Табела 17. Резултати површинских експлозија ТНТ, пентрита и амонекса1 на бетону

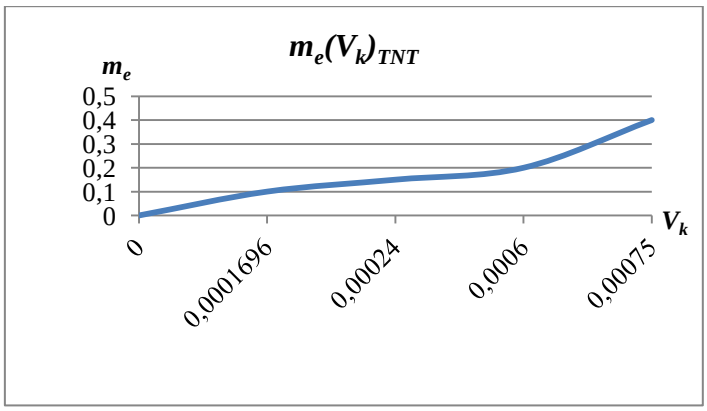
Р. бр	***Експлозив - димензије пуњења [m]***	***Маса експ.[kg]***	***Начин пост.иниц.***	***Конт.пов. $P_k[m^2]$***	***Димензија [m] кратера d_1 x$d_2$xh***	***Запремина кратера $V_k[m^3]$***
1	0	0	-	0	0	0
2	Амонекс 0,028x0,155	0.100		0.0434	0.17x0.04x0.015	0.0000267
3	Амонекс 2x(0,028x0,155)	0.200		0.0868	0.19x0.08x0.06	0.00023876
4	Амонекс Ø0.060 x 0.130	0.500		0.00783	0.30x0.27x0.07	0.00148
5	ТНТ Ф0.033x0.108	0.100		0.3564	0.18x0.12x0.03	0.0001696
6	ТНТ Ф0.033x0,162	0.150		0,00535	0,18x0,17x0,03	0,00024
7	ТНТ 0.100x0.050x0.025	0.200		0.005	0.25x0.23x0.04	0.0006
8	ТНТ2x(0.100x0.050x0.025)	0.400		0.005	0.29x0.22x0.045	0.000752
9	РЕР Ø0.020 x0.140	0.100		0.028	0.24x0.20x0.04	0.000502
10	РЕР 2x(Ø0.020 x0.140)	0.200		0.028	0.30x0.27x0.06	0.00127
11	РЕР 0.080x0.035x0.025	0.250		0.0028	0.32x0.28x0.055	0.00129



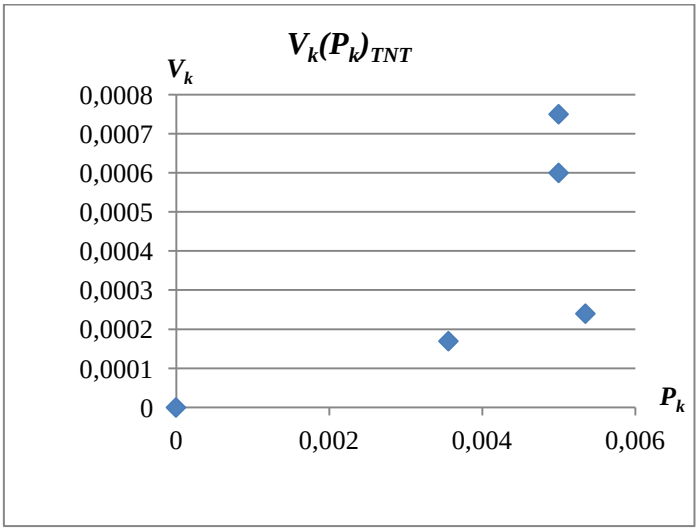
Сл. 57. Зависност масе експлозива m_e од запремине кратера V_k - експлозија амонекса1 на бетону



Сл. 58. Зависност запремине кратера V_k од контактне површине P_k - експлозија амонекса1 на бетону

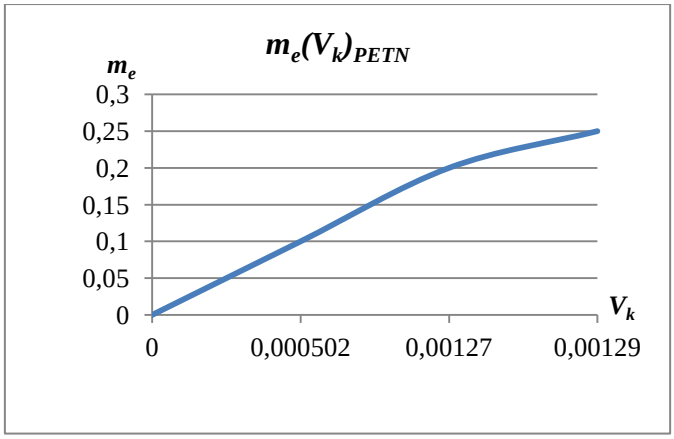


Сл. 59. Зависност масе експлозива m_e од запремине кратера V_k - експлозија ТНТ на бетону

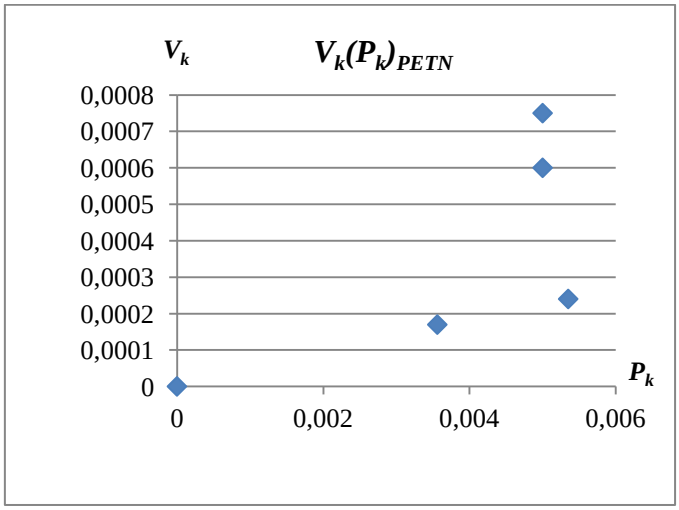


Сл. 60. Зависност запремине кратера V_k од контактне површине P_k - експлозија ТНТ на бетону

На сл. 61. приказана је експериментална зависност масе експлозива и запремине кратера, док је на сл. 62. приказана експериментална зависност запремине кратера и контактне површине у случају површинске експлозије пентрита на бетону.



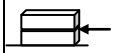
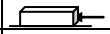
Сл. 61. Зависност масе експлозива m_e од запремине кратера V_k - експлозија пентрита на бетону

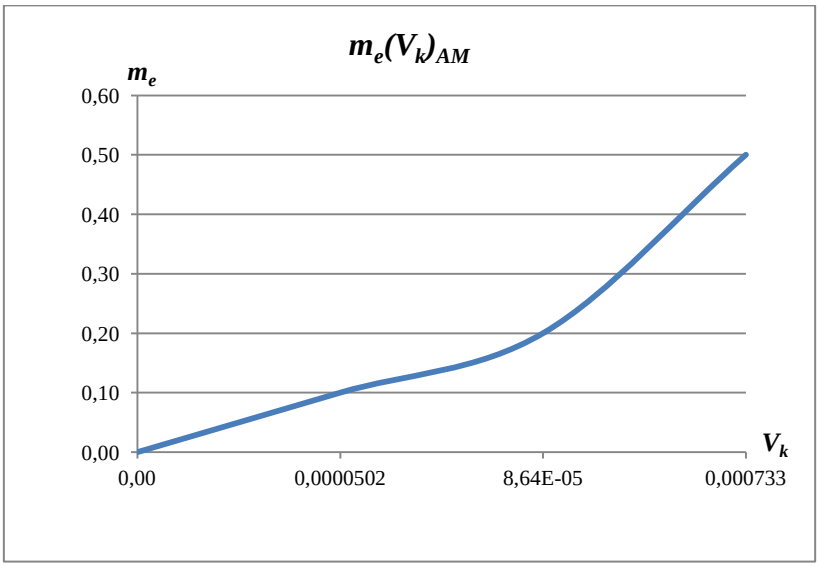


Сл. 62. Зависност запремине кратера V_k од контактне површине P_k - експлозија пентрита на бетону

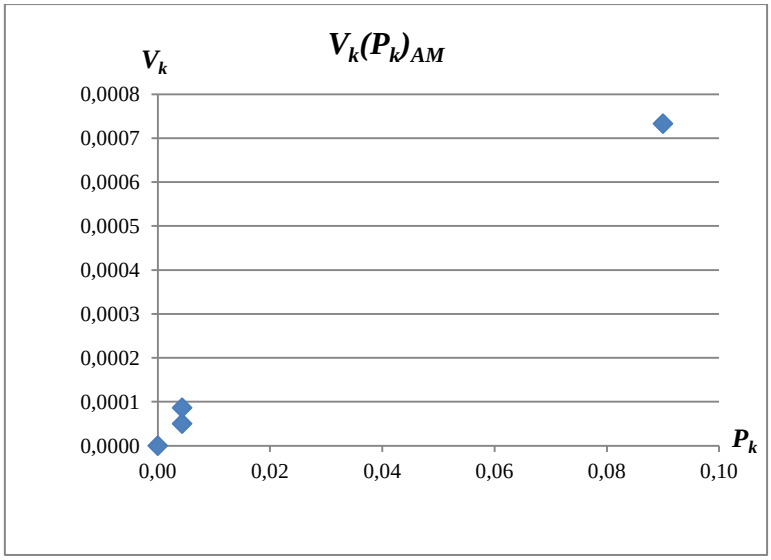
У Табели 18 дат је преглед експерименталних експлозија ТНТ, пентрита и амонекса1 на асфалту. На сл. 63. и 64. приказане су експериментално добијене зависности масе експлозива од запремине кратера одн. зависност запремине кратера од контактне површине у случају експлозије амонекса1 на асфалту. На сл. 65 и 66 приказана је експериментално добијена зависност масе експлозива m_e од запремине кратера V_k, одн. зависност запремине кратера од контактне површине у случају површинске експлозије ТНТ на асфалту. На сликама 67. и 68. приказана је експериментална зависност масе коришћеног експлозива m_e од запремине кратера, одн. зависност запремине кратера од контактне површине у случају површинске експлозије пентрита на асфалту.

Табела 18. Резултати површинских експлозија ТНТ, пентрита и амонекса1 на асфалту

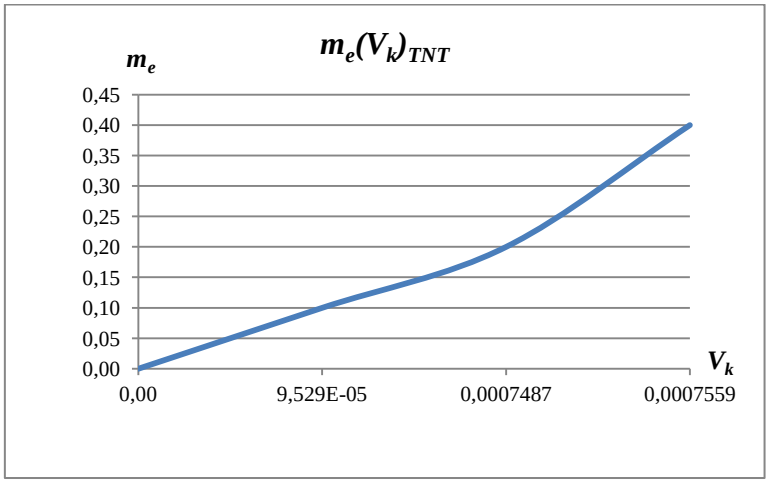
Р. бр	***Експлозив - димензије пуњења [m]***	***Маса експ.[kg]***	***Начин пост.иниц.***	***Конт.пов. $P_k[m^2]$***	***Димензија [m] кратера d_1 x$d_2$xh***	***Запремина кратера$V_k[m^3]$***
1	0	0	-	0	0	0
2	Амонекс 0,028x0,155	0.100		0.00434	0.20x0.08x0.012	0.0000502
3	Амонекс 2x(0,028x0,155)	0.200		0.00434	0.20x0.11x0.015	0.0000864
4	Амонекс (Ø0.050x0.180)	0.500		0.009	0.28x0.20x0.05	0.000733
5	ТНТ Ф0.033x0.108	0.100		0.3564	0.14x0.13x0.02	0.00009529
6	ТНТ 0.100x0.050x0.025	0.200		0.005	0.26x0.20x0.055	0.0007487
7	ТНТ 0.100x0.050x0.050	0.400		0.005	0.25x0.21x0.055	0.0007559
8	PEP Ø0.020 x0.140	0.100		0.0028	0.21x0.20x0.034	0.000374
9	PEP 0.080x0.035x0.025	0.250		0.0028	0.40x0.30x0.07	0.00219
10	PEP 0.150x0.060x0.040	0.500		0.009	0.38x0.38x0.09	0.003402



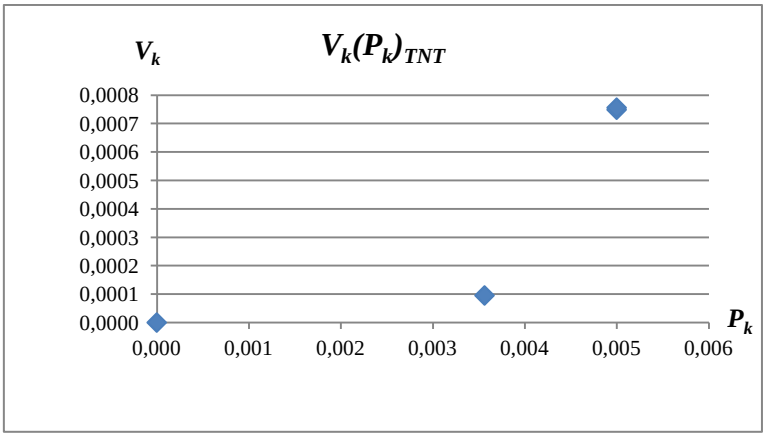
Сл. 63. Зависност масе експлозива m_e од запремине кратера V_k при експлозији амонекса1 на асфалту



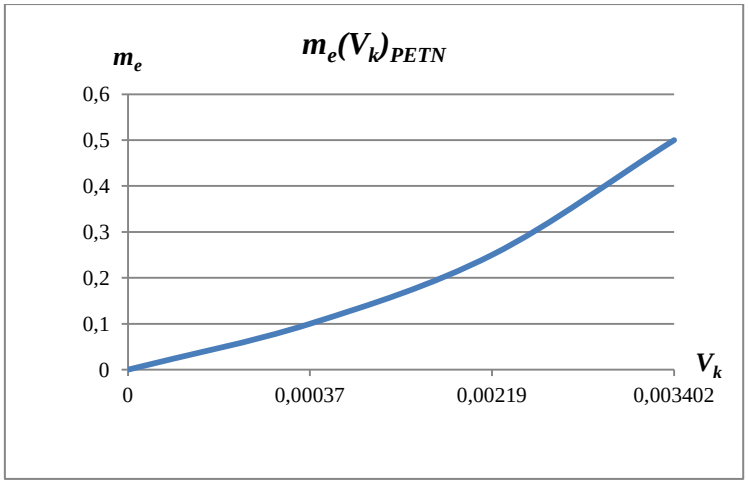
Сл. 64. Зависност запремине кратера V_k од контактне површине P_k при експлозији амонекса1 на асфалту



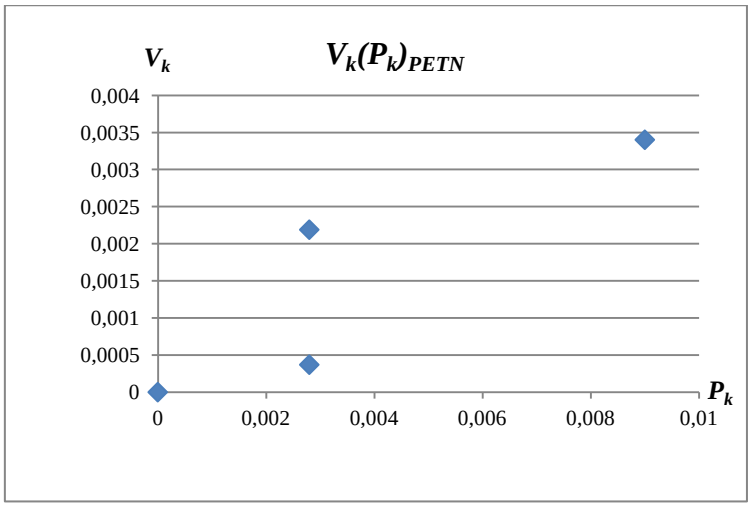
Сл. 65. Зависност масе експлозива m_e од запремине кратера V_k,- експлозија ТНТ асфалт



Сл. 66. Зависност запремине кратера V_k од конт. површине P_k- експлозија ТНТ асфалт



Сл. 67. Зависност масе експлозива од запремине кратера - експлозија пентрит асфалт



Сл. 68. Зависност запремине кратера V_k од контактне површине P_k у случају експлозије пентрита на асфалту

Са слика 47-68, а које приказују експерименталне податке карактеристика коришћеног експлозива и кратера (маса експлозива m_e , контактна површина између експлозива и подлоге P_k и запремина кратера V_k), очигледне су директне зависности посматраних варијабли m_e и V_k, као и променљивост V_k у зависности од m_e и P_k. За површинску експлозију ТНТ на земљи експерименти су показали директну зависност масе експлозива и запремине кратера и у случају хоризонтално и вертикално постављаних експлозивних пуњења. И код осталих случајева површинских експлозија може се закључити да је у питању растућа функција са вредностима у првом квадранту. График функције зависности $m_e(V_k)$ је најсличнији степеној функцији са вредностима само у првом квадранту, због тога што ни маса експлозива, ни запремина кратера, а ни

контактна површина између експлозива и подлоге физички не могу имати негативне вредности. Како су вариране вредности контактних површина, уочено је да за исту масу експлозива, већа контактна површина даје већи кратер. Очигледно је да се за исту контактну површину могу јавити различите запремине кратера, уколико је маса експлозива променљива величина, одн. да исте контактне површине за веће вредности маса експлозива дају веће кратере. Такође, експерименти указују на чињеницу да вредност контактне површине у конкретном случају има утицај на запремину кратера.

7. МОДЕЛИРАЊЕ КАРАКТЕРИСТИКА КРАТЕРА ПРИ ПОВРШИНСКОЈ ЕКСПЛОЗИЈИ

Математичко моделирање уопште подразумева описивање неке појаве математички ради бољег разумевања. Математички модел је идеализација појаве у стварном свету и никада није њена потпуна репрезентација. Процес математичког моделирања може започети испитивањем података из реалног света. Тако се у овом раду, полазећи од резултата експеримената у поглављу 6 може наслутити тип математичке зависности између масе коришћеног експлозива m_e и запремине кратера V_k као значајних варијабли у карактеризацији ефеката експлозије на окружење.

Потребно је изабрати параметре криве која има најбоље поклапање са прикупљеним подацима према неком изабраном критеријуму (нпр.метод најмањих квадрата). У овој ситуацији очекују се и свесно прихватају нека одступања између модела и прикупљених података да би се постигао модел који објашњава понашање. Проблем у овом приступу је што у многим случајевима истраживач није у могућности да направи модел који задовољавајуће објашњава понашање. Тако се не зна унапред која врста криве најбоље описује понашање. Спровођењем експеримената испитује се понашање зависно променљивих за изабране вредности независно променљивих унутар неког опсега и добија *емпиријски модел* базиран на прикупљеним подацима. У том случају истраживач је строго под утицајем података који су пажљиво прикупљани и анализирани, тако да тражи криву која обухвата тренд података ради предвиђања. Ако се наговештава да тренд постоји најпре треба истражити једночлане моделе да би се видело да ли један модел адекватно обухвата тренд података. Графички приказ трансформисаних података често може бити од користи. Уколико се испостави да модел није адекватан приступа се изради другог модела. Уколико је модел адекватан онда је избор модела коначан. (Giordano, et.al, 2003)

Ради избора адекватних међусобних зависности карактеристика кратера потребно је најпре анализирати постојеће емпиријске зависности које се користе за форензички прорачун масе експлозива након површинске експлозије са кратером као последицом.

7.1 Провера постојећих емпиријских релација између масе експлозива и карактеристика кратера кроз експерименталне резултате

Емпиријске једначине (1), (3)-(14) и (17) су провераване кроз добијене експерименталне резултате убацивањем конкретних вредности, које се односе на карактеристике кратера (полупречник, пречник, дубина или запремина), карактеристике подлоге и карактеристике експлозива, у једначине да би се добијена вредност масе експлозива поредила са масом експлозивног пуњења коришћеном за експерименталну површинску експлозију. Маса експлозивног пуњења која је коришћена за експерименталну експлозију третирана је као тачна вредност и рачуната су апсолутна и релативна одступања за све једначине у сврху њихове анализе и давања препоруке за најпоузданију једначину у конкретном практичном форензичком проблему. Резултати провере прорачуна према одговарајућим једначинама приказани су у табелама 19 - 40.

Такође, експериментални резултати експлозија бризантних експлозива (амонекс1, ТНТ и пентрит) су упоређивани и са рачунарским прогамом *Crater Sizes from Explosions and Impacts*[24]. Овај програм омогућава одређивање величине, облика и димензија кратера насталих експлозијом бризантног експлозива и ударом у Сунчевом систему за веома широк опсег величина кратера – од малих насталих у лабораторији до великих са пречником у основи реда величине *km*. Он подразумева једноставне кратере настале избацивањем или ударом у режимима где је фактор гравитације доминантан и оне сложене настале на Месецу и др. небеским телима. Базиран је на експерименталним подацима и методама скалирања које су развили *Holsapple, Schmidt* и *Housen*. При коришћењу програма треба изабрати опцију *Explosions* или *Impacts*, док се тражени резултати који се односе на кратер појављују у одговарајућем пољу. Сваки улазни податак може се изразити у разним јединицама (SI, cgs и др.) а које се аутоматски конвертују. У упутству за коришћење програма наглашено је да се сви ови прорачуни не могу сматрати апсолутно поузданим због веома сложеног понашања тла као и у случајевима малих експлозивних пуњења. Како овај програм (у опцији експлозије) даје могућност избора пуњења облика сфере, полусфере и цилиндра, масе пуњења и подлоге од земље, то је у свим случајевима изабран цилиндричан облик пуњења.

[24]Програм *online* Crater Sizes from Explosions and Impacts, by Keith A.Holsapple, retrieved 18.9.2012. from: http://keith.aa.washington.edu/craterdata/scaling/index.htm

Упоређивани су подаци за подлогу тврда стена, густине ρ_{tla} = 3200kg/m^3, тврдо тло/мека стена, густине ρ_{tla} = 2100kg/m^3 и суво тло густине ρ_{tla} = 1700 kg/m^3. Програм не нуди могућност уписивања других карактеристика подлоге од понуђених. Вредности експериментално одређене густине разликују се од програмом понуђених вредности, те се очекују извесна одступања приликом поређења вредности запремина кратера.

Како у литератури није пронађена емпиријска релација *Keith A. Holsapple*-а између карактеристика кратера, то су упоређени резултати експерименталних површинских експлозија са резултатима из програма *Crater Sizes from Explosions and Impacts* у виду запремине кратера у случају површинске експлозије цилиндричног пуњења одговарајућег експлозива. Запремина кратера добијена према *Holsapple* – у означена је са $V_H[m^3]$. Упоредни преглед дат је у Табелама 41-47.

Табела 19. Резултати прорачуна[25] масе експлозива на основу карактеристика кратера за експлозију Амонекса1 на земљи према једначинама: (1), (3)/(6), (4), (5), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14) и (17)

Маса експлоз. пуњења / Једначина m_e [kg]	0,09	0,1	0,2	0,2	0,2	0,25	0,5	1	1	1,5	2	9
Olsen (1)	0,01848	0,02800	0,09540	0,22406	0,23130	0,29940	0,74163	0,80612	0,39024	0,93715	2,2748	6,45049
Girard/Yallop (3)/(6)	0,00027	0,00053	0,00240	0,00423	0,00309	0,004802	0,01233	0,01877	0,004255	0,03387	0,08460	0,44359
Noon (4)	0,00847	0,01654	0,07526	0,13231	0,09645	0,15000	0,38573	0,58666	0,13213	1,05846	2,64500	13,8600
Noon (5)	0,00135	0,00214	0,00871	0,02422	0,02397	0,03220	0,09080	0,10007	0,04358	0,11864	0,3268	0,43580
Боресков (7)	0,01150	0,02166	0,09890	0,18680	0,15680	0,22420	0,60500	0,80660	0,272901	1,36500	3,4430	17,4300
Власов (8)	0,01021	0,08732	0,09079	0,15961	0,11636	0,18103	0,46648	0,70773	0,72946	1,27692	3,1918	16,7232
Покровский (9)	0,00727	0,01420	0,06463	0,11362	0,08282	0,12886	0,33125	0,50379	0,11362	0,90895	2,27200	11,90410
Kinney (10)	0,01733	0,03387	0,15414	0,27097	0,19753	0,30732	0,79000	1,20148	0,27097	2,16775	5,41856	28,39004
Cook (11)	0,01899	0,02809	0,10932	0,23796	0,23212	0,30055	0,52198	0,81115	0,39847	0,94182	2,29630	3,61153
Merrifield (12)	0,00158	0,00308	0,01400	0,02470	0,01800	0,02800	0,07200	0,10900	0,0247	0,19700	0,49400	2,58800
Szuladzinsky (13)	698,040	689,230	660,730	646,140	654,630	655,600	610,590	523,290	646,14	527,830	576,92	240,880
Јарамаз (14)	0,00055	0,00482	0,00223	0,00471	0,00447	0,00534	0,01857	0,00912	0,00912	0,01619	0,07546	0,33044
Ambrosini (17)	0,00125	0,00306	0,02309	0,04901	0,03215	0,05796	0,24810	0,35701	0,10162	2,66006	24,206	15,20657

[25] Приликом прорачуна рађена је корекција вредности масе с обзиром на јачину ТНТ у односу на Амонекс1 (множење корекционим фактором 1,58) код једначина код којих карактеристике експлозивног пуњења нису узимане у обзир

Табела 20. Апсолутна $|m_e\text{-}m_{PROR}|$ [kg] и релативна $|m_e\text{-}m_{PROR}|/m_e$ одступања прорачунатих маса према j-нама: (1), (3)/(6), (4), (5), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14) и (17) у односу на постављену масу Амонекса1 на земљу

Маса експлоз. пуњења m_e [kg] / једначина	0.09	0,1	0,2	0,2	0,2	0,25	0,5	1	1	1,5	2	9
Olsen (1)	0,07152	0,07200	0,10457	0,02406	0,03130	0,04939	0,24162	0,19388	0,60975	0,56284	0,27483	2,54950
	0,79466	0,72000	0,52285	0,12030	0,15650	0,19744	0,48324	0,19388	0,60975	0,37523	0,13742	0,28327
Girard/Yallop(3)/ (6)	0,08970	0,09950	0,19700	0,19570	0,19690	0,24520	0,48770	0,98100	0,99574	1,46613	1,91530	8,55640
	0,99666	0,99500	0,98500	0,97850	0,98450	0,98080	0,95740	0,98100	0,99574	0,97742	0,95765	0,95071
Noon (4)	0.08153	0,08346	0,12474	0,06769	0,10355	0,10000	0,11427	0,41334	0,86769	0,44154	0,64500	4,86000
	0.90589	0,83460	0,62370	0,33845	0,51775	0,40000	0,22854	0,41334	0,86769	0,29436	0,32250	0,54000
Noon (5)	0,08864	0,09785	0,19128	0,17578	0,17602	0,21775	0,40920	0,89992	0,95641	1,38136	1,67312	8,56410
	89,8737	0,97850	0,95640	0,87890	0,88010	0,87100	0,81840	0,89992	0,95641	0,92091	0,83656	0,95111
Боресков (7)	0,07850	0,07830	0,10110	0,01320	0,04320	0,02580	0,10500	0,19340	0,72709	0,13500	1,44300	8,43000
	0,87222	0,78300	0,50550	0,06600	0,21600	0,10320	0,21000	0,19340	0,72709	0,09000	0,72150	0,93667
Власов (8)	0,07976	0,18732	0,04038	0,04039	0,06897	0,06897	0,03352	0,29226	0,27053	0,22308	1,19182	7,72320
	0,88622	1,87320	0,20190	0,20195	0,34485	0,27588	0,06704	0,29226	0,27053	0,14872	0,59510	0,85813
Покровский (9)	0,08272	0,08579	0,03537	0,08638	0,11717	0,12114	0,08125	0,49621	0,88638	0,59105	0,27204	2,90413
	0,91911	0,85790	0,17685	0,43190	0,58585	0,48456	0,16250	0,49621	0,88638	0,39403	0,13602	0,32268
Kinney (10)	0,07266	0,06612	0,04586	0,07097	0,00246	0,05732	0,29000	0,20147	0,72903	0,66775	3,41856	19,3900
	0,80733	0,66120	0,22930	0,35485	0,01230	0,22928	0,58000	0,20147	0,72903	0,44516	1,70928	2,15444
Cook (11)	0,07101	0,07190	0,09067	0,03796	0,03211	0,05054	0,02198	0,18884	0,60153	0,55818	0,29630	5,38800
	0,78900	0,71900	0,45335	0,18980	0,16055	0,20216	0,04396	0,18884	0,60153	0,37212	0,14815	0,59867
Merrifield (12)	0,08842	0,09692	0,18600	0,17530	0,18200	0,22200	0,42800	0,89100	0,97530	1,30300	1,50600	6,41200
	0,98244	0,96920	0,93000	0,87650	0,91000	0,88800	0,85600	0,89100	0,97530	0,86867	0,60300	0,71244
Szuladzinsky (13)	697,950	689,130	660,530	695,940	654,430	655,350	610,090	592,290	645,140	596,330	574,920	231,880
	7755,00	6891,30	3302,65	3479,70	3272,15	2621,40	1220,18	592,290	645,140	397,553	287,460	25,7644
Јарамаз (14)	0,08945	0,09520	0,19780	0,19530	0,19550	0,24470	0,48140	0,98040	0,99090	1,48380	1,92450	8,66960
	0,99388	0,95200	0,98900	0,97650	0,97750	0,97880	0,96280	0,98040	0,99090	0,98920	0,96225	0,96328
Ambrosini (17)	0,08874	0,09694	0,17690	0,15092	0,16784	0,19204	0,25189	0,64299	0,15092	1,39838	0,66006	6,20657
	0,98600	0,96940	0,88450	0,7546	0,83920	0,76816	0,50378	0,64299	0,15092	0,93225	0,33030	0,68961

Табела 21. Резултати прорачуна масе експлозива на основу карактеристика кратера за експлозију ТНТ на земљи према j-нама: (1), (3)/(6), (4), (5), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14) и (17)

Маса експлоз. пуњења m_e [kg] / једначина	0,1	0,1	0,1	0,18	0,2	0,2	0,2	0,36	0,54	0,54	2	2
Olsen (1)	0,04234	0,01451	0,03428	0,01197	0,16386	0,03138	0,16362	0,17013	0,21279	0,21200	0,27568	0,12008
Girard/Yallop (3)/(6)	0,00043	0,00008	0,00036	0,00268	0,00225	0,00026	0,00168	0,00463	0,00569	0,01039	0,00479	0,00123
Noon (4)	0,01339	0,00256	0,01139	0,08373	0,07018	0,00799	0,52731	0,44000	0,17796	0,32493	0,14992	0,03844
Noon (5)	0,00367	0,00108	0,00289	0,01095	0,01726	0,00261	0,05273	0,01801	0,02326	0,21507	0,03127	0,01209
Боресков (7)	0,02733	0,00901	0,02183	0,12741	0,13581	0,01945	0,12825	0,21893	0,27078	0,47745	0,26049	0,08949
Власов (8)	0,16161	0,03136	0,13741	1,01022	0,84670	0,09651	0,63620	1,74560	2,14710	3,92010	1,80870	0,46370
Покровский (9)	0,02744	0,00532	0,02333	0,17150	0,14375	0,01638	0,10800	0,29635	0,36449	0,66550	0,30706	0,07873
Kinney (10)	0,02743	0,00532	0,02333	0,01715	0,14375	0,01638	0,10800	0,29635	0,36449	0,66550	0,30706	0,07873
Cook (11)	0,04241	0,14465	0,03431	0,11016	0,17099	0,00585	0,16401	0,17051	0,21339	0,21262	0,28439	0,12026
Merrifield (12)	0,00249	0,00048	0,00213	0,01562	0,01309	0,00149	0,00984	0,02699	0,03321	0,06060	0,02797	0,00717
Szuladzinsky (13)	433,843	446,635	435,429	408,951	412,013	438,613	416,63	393,392	393,862	379,133	376,938	421,282
Јарамаз (14)	0,00069	0,00026	0,00054	0,00244	0,00348	0,00053	0,00338	0,00413	0,00519	0,00813	0,03265	0,00239
Ambrosini (17)	0,00269	0,00030	0,00217	0,03102	0,01674	0,00135	0,02451	0,06432	0,08476	0,18914	0,06744	0,01098

Табела 22. Апсолутна | m_e-m_{PROR}| [kg] и релативна |m_e-m_{PROR}|/m_e одступања прорачунатих маса према j-нама: (1), (3)/(6), (4), (5), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14) и (17) у односу на првобитно постављену масу ТНТ на земљи

Маса експлоз. пуњења m_e [kg] / Једначина	0,1	0,1	0,1	0,18	0,2	0,2	0,2	0,36	0,54	0,54	2	2
Olsen (1)	0,05764	0,08549	0,06572	0,168031	0,03614	0,16862	0,03638	0,18987	0,32721	0,32800	1,72434	1,87992
	0,57640	0,85490	0,65722	0,93351	0,18070	0,84310	0,18190	0,52742	0,60594	0,60741	0,86217	0,93996
Girard/Yallop (3)/ (6)	0,09957	0,09992	0,09963	0,17732	0,19775	0,19974	0,19831	0,35537	0,53405	0,52961	1,99520	1,99877
	0,99571	0,99920	0,99635	0,98511	0,98875	0,99870	0,99156	0,98714	0,98898	0,98075	0,99760	0.99938
Noon (4)	0,08661	0,09744	0,08861	0,09627	0,12982	0,19200	0,14727	0,21600	0,36204	0,21507	1,85008	1,96156
	0,86610	0,97441	0,88610	0,53483	0,6491	0,96000	0,73635	0,60000	0,67044	0,39827	0,92504	0,98078
Noon (5)	0,09632	0,09892	0,09711	0,16905	0,18274	0,19739	0,18277	0,34198	0,51674	0,51683	1,96872	1,98790
	0,96320	0,98920	0,97112	0,93916	0,91370	0,98695	0,91385	0,94994	0,95692	0,95709	0,98436	0,99395
Боресков (7)	0,07267	0,09099	0,07816	0,05259	0,06418	0,18054	0,07174	0,14107	0,26921	0,06255	1,73951	1,91050
	0,72670	0,90990	0,78165	0,29216	0,32090	0,90270	0,35870	0,39186	0,49853	0,11583	0,86975	0,25525
Власов (8)	0,06161	0,06864	0,03741	0,83022	0,64670	0,10349	0,43620	1,38565	1,60710	3,38010	0,19130	1,53630
	0,61610	0,68640	0,37413	4,61233	3,23350	0,51745	2,18100	3,84902	2,97611	6,25944	0,09565	0,76815
Покровский (9)	0,07256	0,09468	0,07667	0,00850	0,05625	0,18362	0,09199	0,06365	0,17755	0,12550	1,69294	1,92126
	0,72564	0,94680	0,76672	0,04722	0,28125	0,91810	0,45995	0,17680	0,32879	0,23241	0,84647	0,96063
Kinney (10)	0,07256	0,09468	0,07667	0,00850	0,05625	0,18362	0,09199	0,06365	0,17755	0,12550	1,69294	1,92127
	0,72564	0,94680	0,76672	0,04722	0,28125	0,91810	0,45995	0,17681	0,32879	0,23241	0,84647	0,96063
Cook(11)	0,05758	0,08553	0,06568	0,00698	0,02901	0,19415	0,03599	0,18949	0,32661	0,32738	1,71560	1.87974
	0,57586	0,85535	0,65686	0,03877	0,14505	0,97075	0,17995	0,52636	0,60483	0,60626	0,85780	0,93987
Merrifield (12)	0,09750	0,09952	0,09787	0,16438	0,18690	0,19851	0,19016	0,33333	0,50679	0,47937	1,97202	1,99283
	0,97500	0,99515	0.97874	0,91322	0,93450	0,99255	0,95060	0,92592	0,93850	0,25885	0,98601	0,99641
Szuladzinsky (13)	433,743	446,535	435,329	408,851	411,912	438,413	416,430	393,032	393,322	378,593	374,938	419,282
	4337,43	4465,35	4353,29	2271,39	2059,56	2192,06	2082,15	1091,75	728,374	701,098	187,469	209,641
Јарамаз (14)	0,09930	0,09970	0,09946	0,17760	0,19650	0,01995	0,19660	0,35590	0,53480	0,53190	1,96740	1,9976
	0,99300	0,99700	0,99459	0,98666	0,98250	0,09975	0,98300	0,98861	0,99037	0,98500	0,98370	0,9988
Ambrosini (17)	0,09731	0,09969	0,09783	0,148983	0,18326	0,19865	0,17549	0,29568	0,45524	0,35085	1,93256	1,98901
	0,97306	0,99697	0,97830	0,82768	0,91628	0,99322	0,87744	0,82133	0,84304	0,64972	0,96628	0,99451

Табела 23. Резултати прорачуна[26] масе експлозива на основу карактеристика кратера за експлозију пентрита на земљи према j-нама: (1), (3)/(6), (4), (5), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14) и (17)

Маса експлоз. пуњења / Једначина m_e [kg]	0,05	0,1	0,1	0,2	0,2	0,25	0,25	0,5	1
Olsen (1)	0,04900	0,09640	0,10670	0,20608	0,21445	0,251532	0,09860	0,51175	0,51175
Girard/Yallop (3)/ (6)	0,00047	0,00139	0,00190	0,00398	0,00284	0,00554	0,00284	0,00738	0,01522
Noon (4)	0,01470	0,04330	0,05940	0,12630	0,08870	0,17330	0,08870	0,23070	0,47560
Noon (5)	0,00457	0,00989	0,01110	0,02355	0,02465	0,02957	0,01015	0,03563	0,06660
Боресков (7)	0,03234	0,07760	0,09755	0,20810	0,18252	0,27664	0,13320	0,36037	0,73048
Власов (8)	0,17813	0,52288	0,71720	1,52442	1,07065	2,09112	1,07065	2,78329	5,73804
Покровский (9)	0,04685	0,13752	0,18865	0,40095	0,28159	0,55000	0,28160	0,73205	1,50920
Kinney (10)	0,03024	0,08877	0,12176	0,25879	0,18176	0,35500	0,18176	0,47251	0,97412
Cook (11)	0,04736	0,09664	0,10693	0,20916	0,21525	0,25162	0,23014	0,29740	0,51470
Merrifield (12)	0,00026	0,00809	0,01110	0,02362	0,01658	0,03239	0,01658	0,04312	0,08888
Szuladzinsky (13)	304,661	294,160	425,089	279,642	284,967	274,381	284,967	269,184	247,078
Јарамаз (14)	0,00085	0,00212	0,02118	0,00453	0,00467	0,00578	0,00246	0,00728	0,01428
Ambrosini (17)	0,00344	0,01445	0,02202	0,06018	0,03757	0,09172	0,037569	0,13429	0,35236

[26] Приликом прорачуна рађена је корекција вредности масе с обзиром на јачину ТНТ у односу на пентрит (множење корекционим фактором 0,71 код једначина код којих карактеристике експлозивног пуњења нису узимане у обзир)

Табела 24. Апсолутна – | m_e-m_{PROR}| [kg] и релативна |m_e-m_{PROR}|/m_e одступања прорачунатих маса према j-нама: (1), (3)/(6), (4), (5), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14) и (17) у односу на првобитно постављену масу пентрита на земљи

Маса експлоз. пуњења m_e [kg] / једначина	0,05	0,1	0,1	0,2	0,2	0,25	0,25	0,5	1
Olsen (1)	0,00300	0,00360	0,00670	0,00607	0,01445	0,00153	0,15130	0,20390	0,48825
	0,06000	0,03600	0,06700	0,03035	0,07225	0,00600	0,60520	0,40780	0,48825
Girard/Yallop (3)/ (6)	0,04993	0,09805	0,09809	0,19431	0,19600	0,24219	0,24600	0,48960	0,97857
	0,99866	0,98050	0,98090	0,97153	0,98000	0,96876	0,98400	0,97920	0,97857
Noon (4)	0,02921	0,03896	0,00405	0,03896	0,07501	0,00588	0,12501	0,17507	0,33012
	0,58420	0,38960	0,04050	0,19480	0,37505	0,02352	0,50004	0,35014	0,33012
Noon (5)	0,04350	0,08607	0,08890	0,16682	0,16528	0,20830	0,23570	0,44980	0,90620
	0,87000	0,86070	0,88900	0,83410	0,82640	0,83320	0,94280	0,89960	0,90620
Боресков (7)	0,01766	0,02239	0,00245	0,00810	0,01747	0,02664	0,11679	0,13963	0,26952
	0,35320	0,22390	0,02450	0,04050	0,08735	0,20656	0,46716	0,27926	0,26952
Власов (8)	0,12813	0,42288	0,61725	1,32442	0,87065	1,84112	0,82065	2,28329	4,73804
	2,56260	4,22880	6,17250	6,62210	4,35325	7,36448	3,28260	4,56658	4,73804
Покровский (9)	0,00315	0,03752	0,08865	0,20095	0,08159	0,30000	0,03159	0,23205	0,50920
	0,63000	0,37520	0,88650	1,00475	0,40795	1,20000	0,06318	0,46410	0,50920
Kinney (10)	0,01976	0,01123	0,02176	0,05879	0,01824	0,10500	0,06824	0,02749	0,02588
	0,39520	0,11230	0,21760	0,29395	0,09120	0,42000	0,27296	0,05498	0,02588
Cook (11)	0,00263	0,00336	0,00693	0,00916	0,01525	0,00162	0,01986	0,20259	0,48529
	0,05260	0,03360	0,06930	0,04580	0,07625	0,00648	0,07944	0,40518	0,48529
Merrifield (12)	0,04974	0,09190	0,08888	0,17638	0,18340	0,21760	0,23340	0,45680	0,91110
	0,99480	0,91900	0,88880	0,88190	0,91700	0,87040	0,93360	0,91360	0,91110
Szuladzinsky (13)	304,611	294,060	424,989	279,442	284,766	274,131	284,716	268,684	246,078
	6092,22	2940,60	4249,89	1397,21	1423,83	1096,52	1138,86	537,368	246,078
Јарамаз (14)	0,04910	0,09820	0,09790	0,09790	0,1954	0,19530	0,24420	0,24750	0,49270
	0,98200	0,98200	0,97900	0,48950	0,97700	0,78120	0,97680	0,49500	0,49270
Ambrosini (17)	0,04656	0,08555	0,07797	0,13982	0,16243	0,15828	0,21243	0,36571	0,64763
	0,93122	0,85550	0,77970	0,6991	0,81215	0,63310	0,84972	0,73142	0,64763

Табела 25. Резултати прорачуна масе експлозива на основу карактеристика кратера за експлозију ТНТ на земљи са каменчићима према j-нама: (1), (3)/(6), (4), (5), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14) и (17)

Маса експлоз. пуњења m_e [kg] / Једначина	0,05	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
Olsen (1)	0,02717	0,43893	0,10094	0,12367	0,26606	0,13700	0,14937	0,16342
Girard/Yallop (3)/ (6)	0,00031	0,00049	0,00235	0,00268	0,00431	0,00292	0,00371	0,02679
Noon (4)	0,00959	0,01563	0,07343	0,08374	0,13462	0,09112	0,11585	0,08374
Noon (5)	0,00221	0,00383	0,00992	0,01252	0,03004	0,01407	0,01553	0,01721
Боресков (7)	0,01728	0,02921	0,11236	0,12997	0,23813	0,14230	0,17684	0,14242
Власов (8)	0,17209	0,28023	1,31692	1,50186	2,41421	1,63430	2,07786	1,50186
Покровский (9)	0,01965	0,03200	0,15038	0,17150	0,27658	0,18662	0,23727	0,15721
Kinney (10)	0,01965	0,03200	0,15038	0,17150	0,27658	0,18662	0,23727	0,15721
Cook (11)	0,04067	0,06578	0,15302	0,18576	0,40053	0,20583	0,22459	0,24561
Merrifield (12)	0,00179	0,00292	0,01372	0,01434	0,02516	0,01703	0,02162	0,01432
Szuladzinsky (13)	431,615	431,933	396,400	396,694	385,467	394,809	389,187	396,695
Јарамаз (14)	0,00041	0,00071	0,00218	0,00259	0,00558	0,00287	0,00341	0,00321
Ambrosini (17)	0,00173	0,00307	0,02603	0,03102	0,05841	0,03472	0,04782	0,03102

Табела 26. Апсолутна | m_e-m_{PROR}| [kg] и релативна |m_e-m_{PROR}|/m_e одступања прорачунатих маса према j-нама: (1), (3)/(6), (4), (5), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14) и (17) у односу на првобитно постављену масу ТНТ на земљи са каменчићима

Маса експлоз. пуњења m_e [kg] / једначина	0,05	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
Olsen (1)	0,02283	0,05610	0,00941	0,23675	0,06606	0,06299	0,05062	0,13658
	0,45660	0,56100	0,09410	2,36750	0,33030	0,31495	0,25310	0,45526
Girard/Yallop (3)/ (6)	0,04969	0,09950	0,09765	0,09732	0,19569	0,19708	0,19629	0,29732
	0,99380	0,99500	0,97650	0,97320	0,97845	0,98540	0,98145	0,99106
Noon (4)	0,04040	0,08437	0,02657	0,01626	0,06538	0,10887	0,08412	0,21626
	0, 80808	0,84375	0,26570	0,16260	0,32690	0,54435	0,42060	0,72086
Noon (5)	0,04779	0,09617	0,09007	0,08748	0,16996	0,18593	0,18447	0,28279
	0,95572	0,96170	0,90070	0,87480	0,84980	0,92965	0,92235	0,94263
Боресков (7)	0,03271	0,07078	0,01236	0,02997	0,03813	0,05769	0,02316	0,15758
	0,65420	0,70780	0,12360	0,29970	0,19065	0,28845	0,11580	0,52526
Власов (8)	0,12209	0,18023	1,21692	1,40186	2,21421	1,43430	1,87787	1,20164
	2,44180	1,80230	12,1692	14,0186	11,0711	7,17150	9,38935	4,00546
Покровский (9)	0,03035	0,06800	0,05038	0,07150	0,07568	0,01337	0,03727	0,14278
	0,60700	0,68000	0,50380	0,71500	0,37840	0,06685	0,18635	0,47593
Kinney (10)	0,03035	0,06800	0,05038	0,07150	0,07568	0,01337	0,03727	0,14278
	0,60700	0,68000	0,50380	0,71500	0,37840	0,06685	0,18635	0,47593
Cook (11)	0,00933	0,03342	0,05302	0,08576	0,20053	0,00583	0,02459	0,05438
	0,18654	0,33422	0,53016	0,85760	1,00265	0,02915	0,12295	0,18126
Merrifield (12)	0,04820	0,09708	0,08627	0,08565	0,17484	0,18297	0,17838	0,28567
	0,96400	0,97080	0,86270	0,85650	0,87420	0,91485	0,89190	0,95223
Szuladzinsky (13)	431,56	431,833	396,3002	396,5946	385,267	394,609	388,986	396,395
	8631,2	4318,33	3963,002	3965,946	1926,335	1973,045	1944,93	1321,31
Јарамаз (14)	0,04959	0,09929	0,09782	0,097406	0,19443	0,19713	0,19659	0,29678
	0,99180	0,99290	0,97820	0,97406	0,97215	0,98565	0,98295	0,98926
Ambrosini (17)	0,04827	0,09669	0,07397	0,06898	0,14159	0,16528	0,15218	0,26898
	0,96548	0,96690	0,73967	0,68980	0,70795	0,82640	0,76090	0,89660

Табела 27. Резултати прорачуна[27] масе експлозива на основу карактеристика кратера за експлозију пентрита на земљи са каменчићима

Маса експлоз. пуњења m_e [kg] / Једначина	0,125	0,15
Olsen (1)	0,12787	0,20940
Girard/Yallop (3)/ (6)	0,00248	0,00329
Noon (4)	0,07024	0,10274
Noon (5)	0,01923	0,03379
Боресков (7)	0,11686	0,18634
Власов (8)	1,25976	1,84259
Покровский (9)	0,22287	0,32598
Kinney (10)	0,14385	0,21049
Cook (11)	0,19224	0,31516
Merrifield (12)	0,01313	0,01919
Szuladzinsky (13)	278,976	272,363
Јарамаз (14)	0,00026	0,00442
Ambrosini (17)	0,03874	0,06432

Табела 28. Апсолутна | m_e-m_{PROR}|[kg] и релативна |m_e-m_{PROR}|/m_e одступања прорачунатих маса у одн. на првобитну масу пентрита на земљи са каменчићима

Маса експлоз. пуњења m_e [kg] / Једначина	0,125	0,15
Olsen (1)	0,00287	0,05941
	0,02331	0,39606
Girard/Yallop (3)/ (6)	0,12275	0,14671
	0,98200	0,97806
Noon (4)	0,05476	0,04726
	0,43808	0,31506
Noon (5)	0,11135	0,12601
	0,89077	0,84005
Боресков (7)	0,00814	0,03634
	0,06512	0,24226
Власов (8)	1,13476	1,69259
	9,07808	11,2839
Покровский (9)	0,09787	0,17598
	0,78296	1,17320
Kinney (10)	0,01885	0,06041
	0,15080	0,40273
Cook (11)	0,06724	0,16515
	0,53792	1,10100
Merrifield (12)	0,11187	0,13080
	0,89496	0,87200
Szuladzinsky (13)	278,851	272,213
	2230,81	1814,75
Јарамаз (14)	0,12242	0,14555
	0,97936	0,97033
Ambrosini (17)	0,08626	0,08568
	0,69008	0,57121

[27] Приликом прорачуна рађена је корекција вредности масе с обзиром на јачину ТНТ у односу на пентрит (множење корекционим фактором 0,71 код једначина код којих карактеристике експлозива нису узимане у обзир)

Табела 29. Резултати прорачуна[28] масе експлозива на основу карактеристика кратера за експлозију Амонекса1 на бетону

Маса експлоз. пуњења / Једначина m_e [kg]	0,1	0,2	0,5
Olsen (1)	0,00359	0,02446	0,12074
Girard/Yallop(3)/(6)	0,00011	0,00024	0,00228
Noon (4)	0,00357	0,00759	0,07143
Noon (5)	0,00021	0,00184	0,01106
Боресков (7)	0,01901	0,05839	0,40378
Власов (8)	0,01149	0,02443	0,22981
Покровский (9)	0,00312	0,00664	0,06250
Kinney (10)	0,00732	0,01554	0,14630
Cook (11)	0,27270	0,14297	0,60693
Merrifield (12)	0,00033	0,00069	0,00653
Szuladzinsky 13)	687,188	688,933	637,801
Јарамаз (14)	0,00001	0,000423	0,00230
Ambrosini (17)	0,00039	0,00108	0,02155

Табела 30. Апсолутна | m_e-m_{PROR}|[kg] и релативна $|m_e-m_{PROR}|/m_e$ одступања прорачунатих маса у одн. на првобитну масу Амонекса1 на бетону

Маса експлоз. пуњења / једначина m_e [kg].	0,1	0,2	0,5
Olsen (1)	0,09640	0,17550	0,37920
	0,96400	0,87750	0,75840
Girard/Yallop (3)/ (6)	0,09988	0,19976	0,49771
	0,99880	0,99876	0,99542
Noon (4)	0,09643	0,19240	0,42856
	0,96430	0,96200	0,85712
Noon (5)	0,09979	0,19816	0,48859
	0,99790	0,99080	0,97718
Боресков (7)	0,08099	0,14160	0,09621
	0,80990	0,70300	0,19242
Власов (8)	0,08851	0,17756	0,27018
	0,88510	0,88780	0,54036
Покровский(9)	0,09687	0,19336	0,43749
	0,96870	0,96680	0,87498
Kinney (10)	0,09268	0,18445	0,35369
	0,92680	0,92225	0,70738
Cook (11)	0,07272	0,05703	0,10693
	0,72720	0,28515	0,21386
Merrifield (12)	0,09967	0,19931	0,49346
	0,99670	0,99655	0,98692
Szuladzinsky (13)	687,088	688,73	637,301
	6870,88	3443,65	1274,60
Јарамаз (14)	0,09991	0,19957	0,49769
	0,99906	0,99785	0,99538
Ambrosini (17)	0,09960	0,19891	0,47845
	0,99603	0,99455	0,95690

[28] Приликом прорачуна рађена је корекција вредности масе с обзиром на јачину ТНТ у односу на Амонекс1(множење корекционим фактором 1,58) код једначина код којих карактеристике експлозивног пуњења нису узимане у обзир

Табела 31. Резултати прорачуна масе експлозива на основу карактеристика кратера за експлозију ТНТ на бетону

J-на / Маса пуњења $m_e[kg]$	0,1	0,15	0,2	0,4
Olsen (1)	0,01148	0,01556	0,03479	0,04224
Girard/Yallop (3)/(6)	0,00022	0,14966	0,00086	0,00131
Noon (4)	0,00659	0,01047	0,02700	0,03238
Noon (5)	0,00083	0,00117	0,00294	0,00367
Боресков (7)	0,03129	0,04893	0,12596	0,15176
Власов (8)	0,02120	0,03367	0,08685	0,10418
Покровский (9)	0,01349	0,01965	0,55290	0,06632
Kinney (10)	0,01349	0,01965	0,55290	0,06632
Cook (11)	0,05927	0,073821	0,17395	0,21452
Merrifield (12)	0,00060	0,00096	0,00247	0,00296
Szuladzinsky (13)	432,724	427,246	413,213	410,013
Јарамаз (14)	0,00019	0,00029	0,00069	0,00089
Ambrosini (17)	0,00105	0,00194	0,00686	0,00874

Табела 32. Апсолутна $|m_e\text{-}m_{PROR}|[kg]$ и релативна $|m_e\text{-}m_{PROR}|/m_e$ одступања прорачунатих маса од првобитно постављене масе ТНТ на бетон

J-на / Маса пуњења $m_e[kg]$	0,1	0,15	0,2	0,4
Olsen (1)	0,08852	0,13444	0,16521	0,35775
	0,88520	0,89626	0,82605	0,89437
Girard/Yallop (3)/ (6)	0,09979	0,14966	0,19914	0,39896
	0,99789	0,99773	0,99570	0,99740
Noon (4)	0,09341	0,13953	0,17300	0,36761
	0,93410	0,93020	0,86500	0,91902
Noon (5)	0,09917	0,14883	0,19706	0,39633
	0,99170	0,99220	0,98530	0,99082
Боресков (7)	0,09392	0,10106	0,07404	0,24824
	0,93920	0,67737	0,37020	0,62060
Власов (8)	0,07879	0,11632	0,11314	0,29582
	0,78790	0,77546	0,75426	0,73955
Покровский (9)	0,08650	0,13035	0,14470	0,33367
	0,86500	0,86900	0,72352	0,83417
Kinney (10)	0,08650	0,13035	0,14470	0,33367
	0,86500	0,86900	0,72352	0,83417
Cook (11)	0,04073	0,07618	0,02604	0,18547
	0,40730	0,50786	0,13020	0,46367
Merrifield (12)	0,09939	0,14904	0,19753	0,39704
	0,99397	0,99360	0,98765	0,99260
Szuladzinsky (13)	432,624	427,097	413,013	409,613
	4326,24	2847,31	2065,06	1024,03
Јарамаз (14)	0,09981	0,14971	0,19931	0,39910
	0,99810	0,99806	0,99655	0,99775
Ambrosini (17)	0,09895	0,14800	0,19314	0,39126
	0,98950	0,98667	0,96570	0,97815

Табела 33. Резултати прорачуна[29] масе експлозива на основу карактеристика кратера за површинску експлозију пентрита на бетону

J-на / Маса пуњења $m_e[kg]$	0,1	0,2	0,25
Olsen (1)	0,02107	0,04746	0,36082
Girard/Yallop (3)/(6)	0,00047	0,00103	0,00119
Noon (4)	0,01476	0,03210	0,03744
Noon (5)	0,00174	0,00439	0,00468
Боресков (7)	0,06937	0,15342	0,17606
Власов (8)	0,04750	0,10327	0,12045
Покровский (9)	0,03024	0,06574	0,07668
Kinney (10)	0,03024	0,06574	0,07668
Cook (11)	0,10603	0,23825	0,24152
Merrifield (12)	0,00135	0,00293	0,00342
Szuladzinsky (13)	296,419	286,598	284,361
Јарамаз (14)	0,00041	0,00095	0,00105
Ambrosini (17)	0,00344	0,00968	0,01188

Табела 34. Апсолутна $|m_e\text{-}m_{PROR}|[kg]$ и релативна $|m_e\text{-}m_{PROR}|/m_e$ одступања прорачунатих маса од првобитно постављене масе пентрита на бетон

J-на / Маса пуњења $m_e[kg]$	0,1	0,2	0,25
Olsen (1)	0,07893	0,15254	0,11080
	0,78930	0,76270	0,44320
Girard/Yallop (3)/(6)	0,09953	0,19897	0,24880
	0,99530	0,99485	0,99520
Noon (4)	0,08523	0,16789	0,21256
	0,85230	0,83945	0,85024
Noon (5)	0,09826	0,19560	0,24553
	0,98260	0,97800	0,98212
Боресков (7)	0,03062	0,04658	0,07394
	0,30620	0,23290	0,29576
Власов (8)	0,05249	0,09673	0,12955
	0,52490	0,48365	0,51820
Покровский (9)	0,06976	0,13425	0,17332
	0,69760	0,67125	0,69328
Kinney (10)	0,06976	0,13425	0,17332
	0,69760	0,67125	0,69328
Cook (11)	0,00603	0,03825	0,00847
	0,06030	0,19125	0,03388
Merrifield (12)	0,09865	0,19706	0,24657
	0,98650	0,98530	0,98628
Szuladzinsky (13)	296,319	286,398	284,111
	2963,189	1431,99	1136,445
Јарамаз (14)	0,09958	0,19905	0,24089
	0,99580	9,95250	0,96356
Ambrosini (17)	0,09656	0,19031	0,23811
	0,96560	0,95155	0,95244

[29] Приликом прорачуна рађена је корекција вредности масе с обзиром на јачину ТНТ у односу на пентрит (множење корекционим фактором 0,71) код једначина код којих карактеристике експлозивног пуњења нису узимане у обзир

Табела 35. Резултати прорачуна[30] масе експлозива на основу карактеристика кратера за површинску експлозију Амонекса1 на асфалту

J-на / Маса пуњења $m_e[kg]$	0,1	0,2	0,5
Olsen (1)	0,00625	0,01005	0,06529
Girard/Yallop(3)/(6)	0,00027	0,00037	0,00136
Noon (4)	0,00847	0,01149	0,04266
Noon (5)	0,00039	0,000666	0,00565
Боресков (7)	0,02817	0,03829	0,14826
Власов (8)	0,34051	0,46211	1,71546
Покровский (9)	0,00727	0,00987	0,03663
Kinney (10)	0,01734	0,02335	0,08737
Cook (11)	0,03714	0,05401	0,33426
Merrifield (12)	0,06562	0,08933	0,33604
Szuladzinsky (13)	687,189	681,967	652,873
Јарамаз (14)	0,00064	0,00088	0,00392
Ambrosini (17)	0,00126	0,00189	0,01084

Табела 36. Апсолутна $|m_e\text{-}m_{PROR}|[kg]$ и релативна $|m_e\text{-}m_{PROR}|/m_e$ одступања прорачунатих маса од првобитно постављене масе Амонекса1 на асфалту

J-на / Маса пуњења $m_e[kg]$	0,1	0,2	0,5
Olsen (1)	0,09374	0,18994	0,43471
	0,93740	0,99497	0,86942
Girard/Yallop (3)/ (6)	0,09972	0,19963	0,49863
	0,99720	0,99815	0,99726
Noon (4)	0,09153	0,18851	0,45734
	0,91530	0,94255	0,91468
Noon (5)	0,09961	0,19933	0,49435
	0,99613	0,99665	0,98870
Боресков (7)	0,07183	0,16172	0,35174
	0,71830	0,80860	0,70347
Власов (8)	0,24051	0,26211	1,21546
	2,40510	1,31055	2,43092
Покровский (9)	0,09273	0,19013	0,46336
	0,92730	0,95065	0,92672
Kinney (10)	0,08266	0,17665	0,41263
	0,82660	0,88325	0,82526
Cook (11)	0,06285	0,14599	0,16575
	0,62854	0,72998	0,33150
Merrifield (12)	0,03438	0,11067	0,16396
	0,34378	0,55334	0,32792
Szuladzinsky (13)	687,089	681,767	652,373
	6870,89	3408,84	1304,75
Јарамаз (14)	0,09961	0,19912	0,39766
	0,99610	0,99561	0,79532
Ambrosini (17)	0,09874	0,19812	0,48917
	0,98740	0,99058	0,97833

[30] Приликом прорачуна рађена је корекција вредности масе с обзиром на јачину ТНТ у односу на Амонекс1(множење корекционим фактором 1,58) код једначина код којих карактеристике експлозивног пуњења нису узимане у обзир

Табела 37. Резултати прорачуна масе експлозива на основу карактеристика кратера за површинску експлозију ТНТ на асфалту

J-на / Маса пуњења $m_e[kg]$	0,1	0,2	0,4
Olsen (1)	0,00693	0,04209	0,04245
Girard/Yallop(3)/(6)	0,00015	0,00076	0,00076
Noon (4)	0,00481	0,02376	0,02376
Noon (5)	0,00046	0,00365	0,00368
Боресков (7)	0,02226	0,11608	0,11608
Власов (8)	0,19324	0,95559	0,95559
Покровский (9)	0,00984	0,00487	0,00487
Kinney (10)	0,00984	0,00487	0,00487
Cook (11)	0,03453	0,48007	0,48007
Merrifield (12)	0,03719	0,18695	0,18695
Szuladzinsky (13)	436,030	415,351	415,351
Јарамаз (14)	0,00039	0,00234	0,0234
Ambrosini (17)	0,00068	0,00578	0,00578

Табела 38. Апсолутна $|m_e\text{-}m_{PROR}|[kg]$ и релативна $|m_e\text{-}m_{PROR}|/m_e$ одступања прорачунатих маса од првобитно постављене масе ТНТ на асфалт

J-на / Маса пуњења $m_e[kg]$	0,1	0,2	0,4
Olsen (1)	0,09307	0,15790	0,35754
	0,93070	0,78950	0,89385
Girard/Yallop (3)/ (6)	0,09984	0,19924	0,39924
	0,99840	0,99620	0,99810
Noon (4)	0,09519	0,17623	0,37624
	0,95190	0,88115	0,94060
Noon (5)	0,09953	0,19634	0,39631
	0,99530	0,98170	0,99077
Боресков (7)	0,07774	0,08392	0,28392
	0,77740	0,41960	0,70980
Власов (8)	0,09323	0,75559	0,55559
	0,93230	3,77795	1,38975
Покровский (9)	0,09016	0,15133	0,35133
	0,90160	0,75665	0,87832
Kinney (10)	0,09016	0,15133	0,35133
	0,90160	0,75665	0,87833
Cook (11)	0,06547	0,28007	0,08007
	0,65470	1,40034	0,20017
Merrifield (12)	0,06280	0,01305	0,21305
	0,62801	0,06526	0,53263
Szuladzinsky (13)	435,930	415,351	414,951
	4359,30	2075,75	1037,37
Јарамаз (14)	0,09961	0,19766	0,39766
	0,99610	0,98830	0,99415
Ambrosini (17)	0,09931	0,19421	0,39421
	0,99310	0,97105	0,98552

Табела 39. Резултати прорачуна[31] масе експлозива на основу карактеристика кратера за површинску експлозију пентрита на асфалту

J-на / Маса пуњења $m_e[kg]$	0,1	0,25	0,5
Olsen (1)	0,01628	0,07645	0,11240
Girard/Yallop(3)/(6)	0,00038	0,00190	0,37850
Noon (4)	0,01195	0,05946	0,07609
Noon (5)	0,00129	0,00759	0,01178
Боресков (7)	0,05571	0,28223	0,37097
Власов (8)	0,48041	2,39085	3,05984
Покровский (9)	0,03791	0,18865	0,24144
Kinney (10)	0,02447	0,12176	0,15584
Cook (11)	0,08123	0,39106	0,56313
Merrifield (12)	0,09366	0,47373	0,60779
Szuladzinsky (13)	298,719	276,991	272,625
Јарамаз (14)	0,00101	0,00537	0,00746
Ambrosini (17)	0,00259	0,02202	0,03060

Табела 40. Апсолутна $|m_e\text{-}m_{PROR}|$ $[kg]$ и релативна $|m_e\text{-}m_{PROR}|/m_e$ одступања прорачунатих маса од првобитно постављене масе пентрита на асфалт

J-на / Маса пуњења $m_e[kg]$	0,1	0,25	0,5
Olsen (1)	0,08372	0,17354	0,38759
	0,83720	0,69416	0,77519
Girard/Yallop (3)/ (6)	0,09962	0,24809	0,12149
	0,99620	0,99236	0,24299
Noon (4)	0,08805	0,19054	0,42391
	0,88050	0,76216	0,84781
Noon (5)	0,09870	0,24241	0,48822
	0,98704	0,96964	0,09764
Боресков (7)	0,04428	0,03223	0,12903
	0,44280	0,12892	0,25806
Власов (8)	0,38041	2,14085	2,55984
	3,80410	8,56340	5,11967
Покровский 9)	0,06209	0,06134	0,25856
	0,62090	0,24536	0,51713
Kinney (10)	0,07553	0,12824	0,34416
	0,75533	0,51294	0,68833
Cook (11)	0,01877	0,14106	0,06313
	0,18769	0,56423	0,12625
Merrifield (12)	0,00634	0,22373	0,10779
	0,06342	0,89491	0,21559
Szuladzinsky (13)	298,619	276,741	272,125
	2986,19	1106,96	544,25
Јарамаз (14)	0,09898	0,24462	0,49254
	0,98980	0,97848	0,98508
Ambrosini (17)	0,09741	0,22798	0,46939
	0,97408	0,91192	0,93879

[31] Приликом прорачуна рађена је корекција вредности масе с обзиром на јачину ТНТ у односу на пентрит (множење корекционим фактором 0,71) код једначина код којих карактеристике експлозивног пуњења нису узимане у обзир

Табела 41. Упоредни приказ експерименталних запремина кратера (амонекс1 на земљи) и програмом *Crater Sizes from Explosions and Impacts*[32] са одступањима

Р. бр.	***Маса [kg]***	***Димензија[m]кратера d_1 x d_2 x h***	***Експ.запрем. кратера$V_k[m^3]$***	***Запр.кратера - Holsapple$V_H[m^3]$***	***Апсол. одст. $\|V_k-V_H\|$ $[m^3]$***	***Релат.одступ $\|V_k-V_H\|$ /Vk***
1	0	0	0	0	0	0
2	0,09	0,16x0,12x0,035	0.0001759	0.00162	0,001444	8,2092
3	0,1	0,19x0,16x0,035	0.0002780	0.00179	0,001512	5,4388
4	0,2*	0,4x0,18x0,06	0.0011310	0.00358	0,002449	2,1653
5	0,2	0,4x0,3x0,1	0.0031420	0.00358	0,000438	0,1394
6	0,2*	0,33x0,3x0,12	0.0031100	0.00358	0,000470	0,1511
7	0,25	0,38x0,35x0,12	0.0041780	0.00447	0,000292	0,0698
8	0,5	0,5x0,55x0,18	0.0117800	0.00889	0,002890	0,2453
9	1	0,6x0,55x0,15	0,0129590	0,01800	0,005041	0,3889
10	1 *	0,4x0,3x0,18	0,0056550	0,01800	0,012345	2,1830
11	1,5	0,7x0,7x0,12	0,0153930	0,02600	0,010607	0,6891
12	2	1x0,9x0,18	0,0424120	0,03500	0,007412	0,1748
13	9	2,40x0,90x0,10	0,0565480	0,15500	0,098452	1,7410

Табела 42. Упоредни приказ експерименталних запремина кратера (ТНТ на земљи) и програмом *Crater Sizes from Explosions and Impacts*[33] са одступањима

Р. бр.	***Маса [kg]***	***Димензија[m]кратера d_1 x d_2 x h***	***Експ.запрем. кратера$V_k[m^3]$***	***Запр.кратера - Holsapple$V_H[m^3]$***	***Апсол. одст. $\|V_k-V_H\|$ $[m^3]$***	***Релат.одступ $\|V_k-V_H\|$ /Vk***
1	0	0	0	0	0	0
2	0,1	0.20x0.18x0.08	0.0007536	0.00164	0,0008864	1,17622
3	0,1 *	0.11x0.11x0.07	0.0002216	0.00164	0,0014184	6,40072
4	0,1 *	0,17x0,19x0,07	0,000592	0.00164	0,0010480	1,77027
5	0,18	0.35x0.35x0.07	0.002244	0.00295	0,0007060	0,31461
6	0,2*	0.40x0.26x0.13	0.003538	0.00327	0,0002680	0,07575
7	0,2 *	0.16x0.16x0.08	0.000535	0.00327	0,0027350	5,11215
8	0,2	0.30x0.30x0.15	0.003532	0.00327	0,0002620	0,07418
9	0,36	0.42x0.42x0.08	0.003693	0.00587	0,0021770	0,58949
10	0,54	0.45x0.45x0.09	0.004769	0.00878	0,0040110	0,84105
11	0,54*	0.55x0.55x0.06	0.004749	0.00878	0,0040310	0,84881
12	2	0.50x0.35x0.14	0.006411	0,03200	0,0255890	3,99142
13	2*	0.27x0.27x0.13	0.00248	0,03200	0,0295200	11,90322

[32] http://keith.aa.washington.edu/craterdata/scaling/index.htm доступан 18.9.2012.
[33] Ibid.

Табела 43. Упоредни приказ експерименталних запремина кратера (пентрит на земљи) и програмом *Crater Sizes from Explosions and Impacts*[34] са одступањима

Р. бр	***Маса [kg]***	***Димензије кратера d_1 x d_2 x h***	***Експ.запремина кратера $V_k[m^3]$***	***Запремина кратера - Holsapple $V_H[m^3]$***	***Апсолутно одступање $\|V_k-V_H\|$ $[m^3]$***	***Релативно одступање $\|V_k-V_H\|/Vk$***
1	0	0	0	0	0	0
2	0,05	0.24x0.20x0.10	0.001256	0.000853	0,000403	0,32086
3	0,1	0.32x0.31x0.11	0.002855	0.000170	0,002685	0,94045
4	0,1 *	0.35x0.35x0.10	0.003205	0.000170	0,003035	0,94685
5	0,2	0.50x0.40x0.13	0.006800	0.003390	0,003410	0,50147
6	0,2 *	0.40x0.40x0.17	0.007117	0.003390	0,003727	0,52367
7	0,25	0.50x0.50x0.13	0.008504	0.004230	0,004274	0,50258
8	0,25 *	0.40x0.40x0.07	0.002930	0.004230	0,001300	0,44368
9	0,5	0.55x0.55x0.13	0,01029	0.008430	0,001860	0,18075
10	1	0.70x0.70x0.15	0,01923	0,017000	0,002230	0,11596

Табела 44. Упоредни приказ експерименталних запремина кратера (ТНТ на земљи са каменчићима) и програмом *Crater Sizes from Explosions and Impacts*[35] са одступањима

Р. бр	***Маса [kg]***	***Димензије кратера d_1 x d_2 x h***	***Експ.запремина кратера $V_k[m^3]$***	***Запремина кратера - Holsapple $V_H[m^3]$***	***Апсолутно одступање $\|V_k-V_H\|$ $[m^3]$***	***Релативно одступање $\|V_k-V_H\|/Vk$***
1	0	0	0	0	0	0
2	0,05	0.17x0.17x0.06	0.00045396	0,000823	0,0003691	0,81317
3	0,1	0.20x0.20x0.075	0.00078539	0,00164	0,0008457	1,07691
4	0,1*	0.37x0.30x0.07	0.00203418	0,00164	0,0003941	0,19375
5	0,1*	0.35x0.35x0.08	0.00256563	0,00164	0,0009256	0,36077
6	0,2 *	0.40x0.42x0.14	0.00615752	0,00327	0,0028875	0,46894
7	0,2	0.36x0.36x0.085	0.00288398	0,00327	0,0003861	1,33881
8	0,2*	0.38x0.40x0.08	0.00318348	0,00327	0,0000866	0,02720
9	0,3	0.35x0.35x0.11	0.00352774	0,00490	0,0013723	0,38901

[34] Ibid.
[35] Ibid.

Табела 45. Упоредни приказ експеримент. запремина кратера (пентрит на земљи са каменчићима) и програмом *Crater Sizes from Explosions and Impacts*[36] са одступањима

Р. бр	***Маса [kg]***	***Димензије[m]кратера d_1 x d_2 x h***	***Експ.запрем.кратера $V_k[m^3]$***	***Запр.кратера – HolsappleV$_H[m^3]$***	***Апсол. одст. $\|V_k-V_H\|$ $[m^3]$***	***Релат.одступ $\|V_k-V_H\|$ /Vk***
1	0	0	0	0	0	0
2	0,125	0,37x0,37x0,11	0,00394243	0,00212	0,0018224	0,46225
3	0,150	0,42x0,42x0,15	0,00692721	0,00255	0,0043772	0,63188

Табела 46. Упоредни приказ експеримент. запремина кратера (ТНТ, пентрит и амонекс1 на бетону) и програмом *Crater Sizes from Explosions and Impacts*[37] са одступањима

Р. бр	***Експлозив - димензије пуњења [m]***	***Маса експл. [kg]***	***Димензије кратера[m] d_1 x d_2 x h***	***Експ.запр. кратера $V_k[m^3]$***	***Запр.крат. – тврда стена (Holsapple) $V_H[m^3]$***	***Апс. одст. $\|V_k-V_H\|$ $[m^3]$***	***Релат.одст. $\|V_k-V_H\|$ /Vk***
1	0	0	0	0	0	0	0
2	Амонекс-1 0,028x0,155	0.100	0.17x0.04x0.015	0.0000267	0.00104	0,000773	28,95131
3	Амонекс-1 2x(0,028x0,155)	0.200	0.19x0.08x0.06	0.00023876	0.00208	0,001840	7,70842
4	Амонекс-1 Ø0.060 x 0.130	0.500	0.30x0.27x0.07	0.0014800	0.00521	0,003730	0,00225
5	ТНТ Ф0.033x0.108	0.100	0.18x0.12x0.03	0.0001696	0.000972	0,000802	4,72877
6	ТНТ Ф0.033x0,162	0.150	0,18x0,17x0,03	0,0002400	0,00146	0,001220	5,08333
7	ТНТ 0.100x0.050x0.025	0.200	0.25x0.23x0.04	0.000602	0.00194	0,001338	2,22259
8	ТНТ 0.100x0.050x0.025	0.200*	0.28x0.23x0.045	0.000758	0.00194	0,001182	1,55936
9	ТНТ 2x(0.100x0.050x0.025)	0.400	0.29x0.22x0.045	0.000752	0,00652	0,005768	7,69415
10	пентрит Ø0.020 x0.140	0.100	0.24x0.20x0.04	0.000502	0.00102	0,000518	1,03187
11	пентрит 2x(Ø0.020 x0.140)	0.200	0.30x0.27x0.06	0.001270	0.00205	0,000780	0,61417
12	пентрит 0.080x0.035x0.025	0.250	0.32x0.28x0.055	0.00129	0.00256	0,001270	0,98449

[36] Ibid.
[37] Ibid.

Табела 47. Упоредни приказ експеримент. запремина кратера (ТНТ, пентрит и амонекс1 на асфалту) и програмом *Crater Sizes from Explosions and Impacts*[38] са одступањима

Р. бр	***Експлозив - димензије пуњења [m]***	***Маса експл [kg]***	***Димензије [m] кратера d_1 x d_2 x h***	***Експ.запремина кратера $V_k[m^3]$***	***Запр. кратера - тврда стена (Holsapple)$V_H[m^3]$***	***Апсол. одст. $\|V_k-V_H\|$ $[m^3]$***	***Релат.одступ $\|V_k-V_H\|$ /Vk***
1	0	0	0	0	0	0	0
2	Амонекс-1 Ф0,028x0,155	0.100	0.20x0.08x0.012	0.0000502	0.000255	0,0002048	4,07968
3	Амонекс-1 2x(0,028x0,155)	0.200	0.20x0.11x0.015	0.0000864	0.000509	0,0004226	4,89120
4	Амонекс-1 (Ø0.050x0.180)	0.500	0.28x0.20x0.05	0.000733	0.001270	0,0005370	0,73261
5	ТНТ Ф0.033x0.108	0.100	0.14x0.13x0.02	0.00009529	0.000238	0,0001428	1,50000
6	ТНТ 0.100x0.050x0.025	0.200	0.26x0.20x0.055	0.0007487	0.000475	0,0002783	0,37171
7	ТНТ 0.100x0.050x0.050	0.400	0.25x0.21x0.055	0.0007559	0,000951	0,0002023	0,26763
8	Пентрит Ø0.020 x0.140	0.100	0.21x0.20x0.034	0.000374	0.000250	0,000124	0,33155
9	Пентрит 0.080x0.035x0.025	0.250	0.40x0.30x0.07	0.00219	0.000626	0,001564	0,71415
10	Пентрит 0.150x0.060x0.04	0.500	0,38x0.38x0.09	0.003402	0,00125	0.002152	0,63257

7.2 Зависност масе коришћеног експлозива и запремине кратера добијена апроксимацијом криве из експерименталних података

Посматрајмо као инжењерски проблем одређивање коришћене масе експлозива на основу запремине кратера који је настао као последица површинске експлозије бризантног експлозива, а који може бити реално постављен од стране суда форензичком инжењеру. Као у многим инжењерским проблемима, познати су подаци само за низ дискретних тачака - уређених парова (m_e,V_k). За такве податке немамо аналитички израз којим можемо одредити функционалну зависност $m_e=m(V_k)$ већ имамо табеларно задату функцију $m_{ei}=m(V_{ki})$, $i=1,\ldots,n$. У оваквим случајевима често се

[38] Ibid.

тражи апроксимација функције неком једноставном функцијом $m_e=f(V_k)$, која се бира према природи модела, тзв. генералисани полином. Апроксимацијом се долази до функције које апроксимирају групу података на најбољи могући начин без обавеза да апроксимациона крива тачно пролази кроз све познате тачке. Апроксимациона функција обично зависи од параметара a_k , $k=0,1,2,...,m$, које треба одредити према неком критеријуму, т.ј.

$m_e=f(V_k,a_0,a_1,\ldots,\ a_m)$ ..... (52)

Тиме се проблем апроксимације функције своди на избор облика функције $m_e=f(V_k)$ и одређивање параметара a_k, $k = 0,1,2,...,m$.

Експериментални подаци за експлозију све три врсте експлозива на подлогама – земље, земља са каменчићима, бетон и асфалт су показали да је за генералисани полином најбоље изабрати нелинеарну апроксимацију, растућу степену функцију и то оном која има вредности само у првом квадранту и почетком у (0;0), што је и логично с обзиром да ни маса експлозива а ни запремина кратера реално не могу имати негативне вредности. Такође, поједине емпиријске једначине за процену масе експлозива су приказивале зависност између масе експлозива и запремине кратера у облику степене функције (нпр.једначина *Olsena* означена са (1)), а која генерално није дала велика одступања у експериментима површинских експлозија са малим масама експлозива (до 10*kg*). Једначина (13), коју је дао *Szuladzinsky* и која означава квадратну зависност између масе експлозива и пречника кратера као једне његове карактеристике, дала је веома велика одступања при провери кроз експерименталне податке. Такође, једначина коју је навео *Noon* – (5), а која приказује линеарну зависност масе експлозива и запремине кратера, дала је велика одступања. Тако, претпоставимо да је зависност масе коришћеног експлозива M_e и запремине кратера V_k степена функција облика:

$M_e=aV_k^b$ ..... (53)

где су a и b параметри. Логаритмовањем леве и десне стране једначине добијамо:

$lnM_e=lna+blnV_k$ ..... (54)

Увођењем смена: $Y=lnM_e$; $A=lna$; ; $X=lnV_k$ ..... (55)

Добијамо:

Y= A+ BX ..... (56)

чиме се проблем своди на апроксимацију полиномом првог реда. Апроксимација полиномом *n*-тог реда, $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + ... + a_nx^n$, ради се када је дато N тачака (x_i,Y_i), $i = 1, 2, ..., n$. Збир квадрата девијација је:

$$S(a_0,a_1,...,a_n) = \Sigma_{i=1}^{N} e_i^2 = \Sigma_{i=1}^{N}(Y_i-y_i)^2 = \Sigma_{i=1}^{N}(Y_i - a_0 - a_1x - a_2x^2 -...- a_nx^n)^2 \quad \text{.....(57)}$$

Потребан услов за постојање екстрема ове функције је:

$$\partial S/\partial a_k = \Sigma_{i=1}^{N} 2(Y_i - a_0 - a_1x - a_2x^2 -...- a_nx^n)(-x_i^k) = 0, k = 1, 2, ..., n. \quad \text{.....(58)}$$

Након преуређивања, добија се систем $(n+1)$ једначина:

$$a_0N + a_1 \Sigma_{i=1}^{N} x_i + ... + a_n \Sigma_{i=1}^{N} x_i^n = \Sigma_{i=1}^{N} Y_i$$

$$a_0 \Sigma_{i=1}^{N} x_i + a_1 \Sigma_{i=1}^{N} x_i^2 + ... + a_n \Sigma_{i=1}^{N} x_i^{n+1} = \Sigma_{i=1}^{N} x_iY_i$$

…… .....(59)

$$a_0 \Sigma_{i=1}^{N} x_i^n + a_1 \Sigma_{i=1}^{N} x_i^{n+1} + ... + a_n \Sigma_{i=1}^{N} x_i^{2n} = \Sigma_{i=1}^{N} x_i^nY_i$$

Тако се у случају апроксимације линеарном функцијом $y=a+bx$ добија систем:

$$aN + b\Sigma_{i=1}^{N} x_i = \Sigma_{i=1}^{N} Y_i \quad \text{..... (60)}$$

$$a\Sigma_{i=1}^{N} x_i + b \Sigma_{i=1}^{N} x_i^2 = \Sigma_{i=1}^{N} x_iY_i \quad \text{..... (61)}$$

Апроксимација полиномом првог реда се најчешће користи. Из овог система једначина непознате *a* и *b* израчунавамо из:

$$a = D_a/ D , b = D_b/D \quad \text{..... (62)}$$

А одговарајуће детерминанте у општем случају су:

$$D = \begin{vmatrix} N & \Sigma_{i=1}^{N} x_i \\ \Sigma_{i=1}^{N} x_i & \Sigma_{i=1}^{N} x_i^2 \end{vmatrix}, D_a = \begin{vmatrix} \Sigma_{i=1}^{N} Y_i & \Sigma_{i=1}^{N} x_i \\ \Sigma_{i=1}^{N} x_iY_i & \Sigma_{i=1}^{N} x_i^2 \end{vmatrix}, D_b = \begin{vmatrix} N & \Sigma_{i=1}^{N} Y_i \\ \Sigma_{i=1}^{N} x_i & \Sigma_{i=1}^{N} x_iY_i \end{vmatrix}$$

Параметри растуће степене функције се бирају тако да функција има најбоље поклапање у смислу методе најмањих квадрата. Посебно су рађене апроксимације за случај површинске експлозије амонекса 1, ТНТ и пентрита на земљи, бетону и асфалту а према одговарајућем броју тачака експериментално добијених. Апроксимације

функција рађене су у *Excel*-у, као једном од комерцијалних софтвера који се користе за нумеричко решавање инжењерских и научних проблема. Тако је предложено 11 различитих зависности масе експлозива од запремине кратера $M_e(V_k)$ сходно броју уређених парова масе коришћеног експлозива и површинском експлозијом добијене запремине кратера, а које имају најбоље поклапање са експерименталним подацима. У случају истих вредности маса експлозивног пуњења а различите контактне површине примећена су одступања запремине кратера. Стога су за апроксимацију функције бирана само положена пуњења, тј. случај када је експлозивно пуњење постављено тако да најдужом страном додирује подлогу. За експлозију амонекса1 на земљи, вредности потребне за апроксимацију функције дате су у табелама 48 и 49.

Табела 48. Вредности $Y=ln(m_e)$, $X=ln(V_k)$, X^2, XY, апроксимиране функције - M_e и одступања од експериментално добијених вредности (амонекс1-земља)

m_e	V_k	$Y=ln(m_e)$	$X=ln(V_k)$	X^2	XY	M_e	$M_e - m_e$
0	0	0	0	0	0	0	0
0.09	0.0001759	-2.40795	-8.64559	74.74631	20.81812	0.05439	-0.03561
0.10	0.0002780	-2.30259	-8.18789	67.04153	18.85331	0.07446	-0.02554
0.20	0.0031420	-1.60944	-5.76290	33.21097	9.27502	0.39339	0.19339
0.25	0.0041780	-1.38629	-5.47792	30.00764	7.59401	0.47838	0.22838
0.50	0.0117800	-0.69315	-4.44135	19.72561	3.07851	0.97447	0.47447
1.00	0.0129590	0.00000	-4.34596	18.88741	0.00000	1.04040	0.04040
1.50	0.0153930	0.40547	-4.17384	17.42096	-1.69235	1.17087	-0.32913
2.00	0.0424120	0.69315	-3.16032	9.98765	-2.19057	2.34765	0.34765
9.00	0.0565480	2.19722	-2.87267	8.25221	-6.31189	2.86011	-6.13989
SUMA:	0.147	-5.103573	-47.068451	279.280281	49.424173	-	-

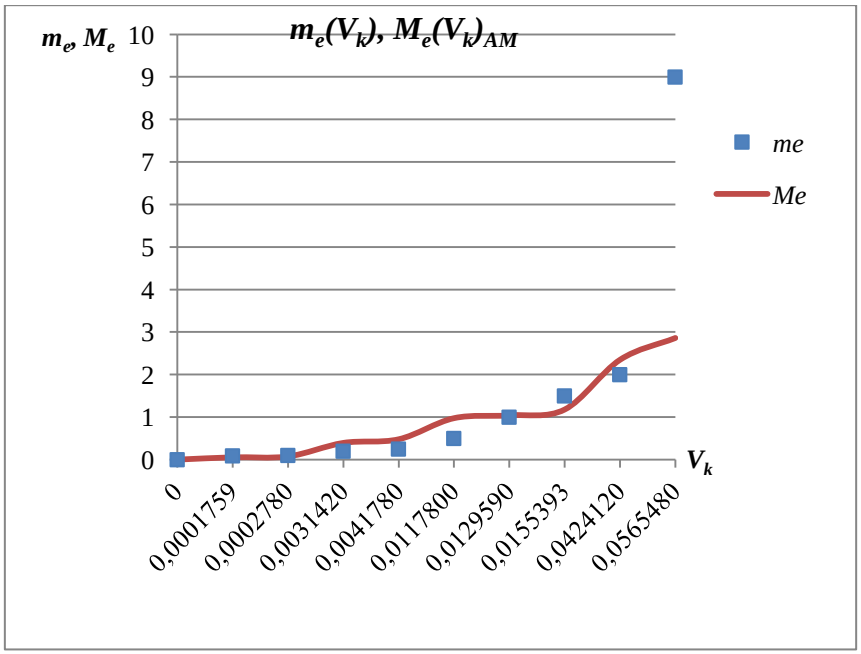
Табела 49. Вредности детерминанти *D, Da, Db* и коефиц. *A, B* и *a* (амонекс1-земља)

N	9
D	298.083417
Da	900.991903
Db	204.600266
A	3.022617
B	0.686386
a	20.544981

Апроксимирана функција зависности масе коришћеног експлозива од запремине кратера у случају површинске експлозије амонекса1 на земљи ће гласити:

$$M_e = 20.544981 V_k^{0,686386} \quad \text{..... (63)}$$

Апроксимирана функција $M_e(V_k)$ и функција добијена експериментално $m_e(V_k)$ приказане су на слици 69.



Сл. 69. Дијаграм експерименталне зависности масе експлозива m_e и запремине кратера V_k и апроксимација функције $M_e(V_k)$ при експлозији амонекса1 на земљи

У случају површинске експлозије ТНТ на земљи потребни подаци за добијање зависности *Me(V)* дати су у табелама 50 и 51.

Табела 50. Вредности $Y=ln(m_e)$, $X=ln(V_k)$, X^2, XY, апроксимиране функције - M_e и одступања од експериментално добијених вредности (ТНТ -земља)

m_e	V_k	$Y=ln(m_e)$	$X=ln(V_k)$	X^2	XY	M_e	M_e-m_e
0,10	0,0007536	-2,30259	-7,19065	51,70543	16,55708	0,06677	-0,03323
0,18	0,0022440	-1,71480	-6,09950	37,20384	10,45940	0,24127	0,06127
0,20	0,0035320	-1,60944	-5,64589	31,87609	9,08671	0,41157	0,21157
0,36	0,0036930	-1,02165	-5,60132	31,37474	5,72259	0,43375	0,07375
0,54	0,0047690	-0,61619	-5,34562	28,57564	3,29390	0,58612	0,04612
2,00	0,0064110	0,69315	-5,04974	25,49987	-3,50021	0,83038	-1,16962
SUMA:	0,021	-6,571512	-34,932710	206,235614	41,619471	-	-

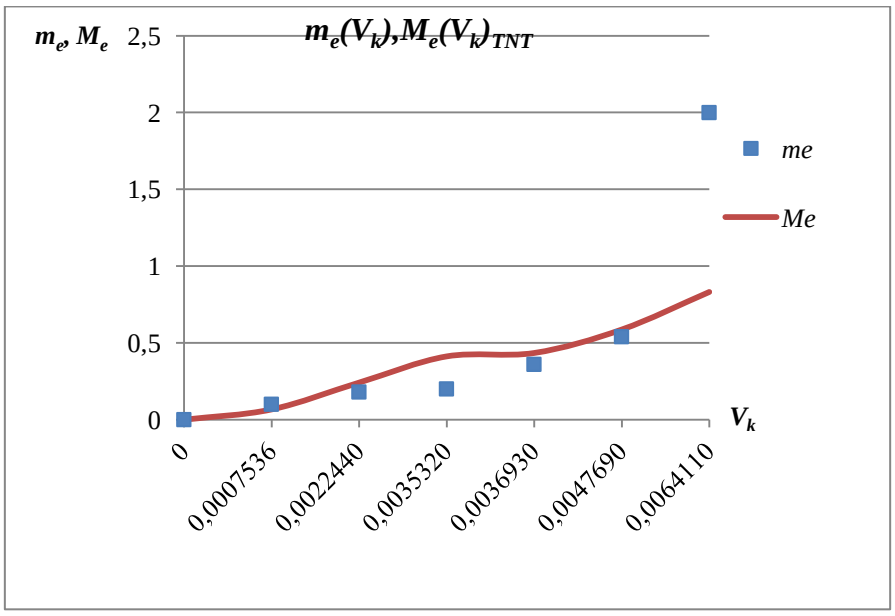
Табела 51. Вредности детерминанти *D, Da, Db* и коефиц. *A, B* и *a* (ТНТ – земља)

N	6
D	17,119462
Da	98,601185
Db	20,156119
A	5,759596
B	1,177380
a	317,220188

Апроксимирана функција зависности масе коришћеног експлозива од запремине кратера у случају површинске експлозије ТНТ на земљи ће гласити:

$$M_e = 317{,}220188 V_k^{1{,}17738} \quad \text{..... (64)}$$

За експозију ТНТ на земљи дијаграми апроксимиране функције $M_e(V_k)$ и функције добијене експериментално $m_e(V_k)$ приказани су на слици 70:



Сл. 70. Дијаграм експерименталне зависности масе експлозива m_e и запремине кратера V_k и апроксимација функције $M_e(V_k)$ при експлозији ТНТ на земљи

За случај површинске експлозије пентрита на земљи потребни подаци за добијање зависности $M_e(V_k)$ дати су у Табелама 52 и 53.

Табела 52. Вредности $Y=ln(m_e)$, $X=ln(V_k)$, X^2, XY, апроксимиране функције - M_e и одступања од експериментално добијених вредности m_e-M_e (пентрит – земља)

m_e	V_k	$Y=ln(m_e)$	$X=ln(V_k)$	X^2	XY	M_e	$m_e - M_e$
0	0	0	0	0	0	0	0
0.05	0.001256	-2.99573	-6.67982	44.62004	20.01096	0.04252	-0.00748
0.10	0.002855	-2.30259	-5.85868	34.32417	13.49012	0.10288	0.00288
0.20	0.006800	-1.60944	-4.99083	24.90841	8.03244	0.26179	0.06179
0.25	0.008504	-1.38629	-4.76722	22.72637	6.60877	0.33301	0.08301
0.50	0.010290	-0.69315	-4.57658	20.94511	3.17225	0.40884	-0.09116
1.00	0.019240	0.00000	-3.95076	15.60853	0.00000	0.80174	-0.19826
SUMA:	0.049	-8.987197	-30.823905	163.132638	51.314528		

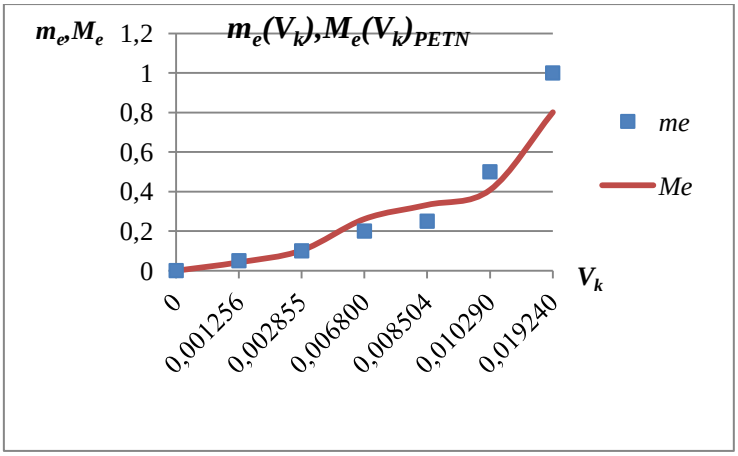
Табела 53. Вредности детерминанти D, Da, Db и коеф. A, B и a (пентрит – земља)

N	6
D	28.682740
Da	115.608988
Db	30.866672
A	4.030612
B	1.076141
a	56.295333

Апроксимирана функција зависности масе коришћеног експлозива од запремине кратера у случају површинске експлозије пентрита на земљи ће гласити:

$$M_e=56{,}295333V_k^{1{,}076141} \quad \text{(65)}$$

За експлозију пентрита на земљи дијаграми апроксимиране функције $M_e(V_k)$ и функције добијене експериментално $m_e(V_k)$ приказани су на слици 71.



Сл. 71. Дијаграм експерименталне зависности масе експлозива m_e и запремине кратера V_k и апроксимација функције $M_e(V_k)$ при експлозији пентрита на земљи

У случају површинске експлозије ТНТ на подлози од земље са каменчићима, потребни подаци за добијање зависности $M_e(V_k)$ дати су у табелама 54 и 55.

Табела 54. Вредности $Y=ln(m_e)$, $X=ln(V_k)$, X^2, XY, апроксимиране функције - M_e и одступања од експериментално добијених вредности m_e-M_e (ТНТ - земља са каменчићима)

m_e	V_k	$Y=ln(m_e)$	$X=ln(V_k)$	X^2	XY	M_e	$m_e - M_e$
0	0	0	0	0	0	0	0
0.05	0.000454	-2.99573	-7.69750	59.25153	23.05965	0.08726	0.03726
0.1	0.000785	-2.30259	-7.14933	51.11292	16.46194	0.10419	0.00419
0.2	0.002884	-1.60944	-5.84858	34.20593	9.41293	0.15870	-0.04130
0.3	0.003528	-1.20397	-5.64710	31.88971	6.79895	0.16939	-0.13061
SUMA	0.008	-8.112	-26.343	176.460	55.733	-	-

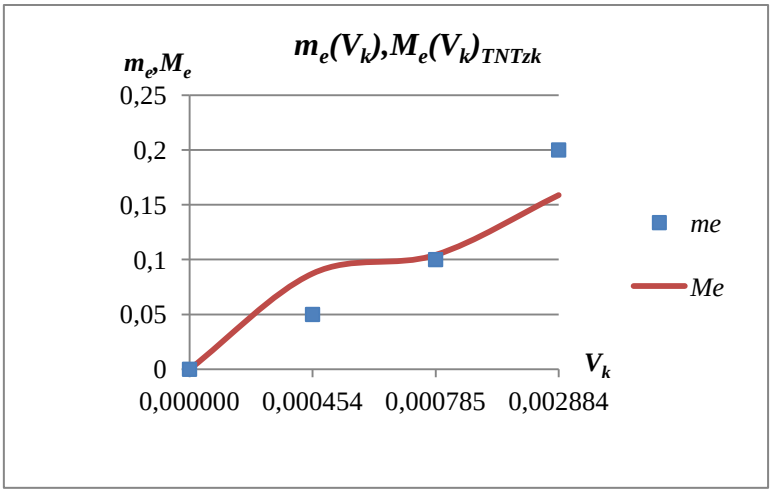
Табела 55. Вредности детерминанти *D*, *Da*, *Db* и коефицијената *A*, *B* и *a* у случају експлозије ТНТ на земљи са каменчићима

N	8
D	717.752779
Da	36.763595
Db	232.184531
A	0.051220
B	0.323488
a	1.052555

Апроксимирана функција зависности масе коришћеног експлозива од запремине кратера у случају површинске експлозије ТНТ на земљи са каменчићима ће гласити:

$$M_e=1{,}052555V_k^{0.323488} \quad \text{..... (66)}$$

За експлозију ТНТ на земљи са каменчићима дијаграм апроксимиране функције $M_e(V_k)$ и података добијених експериментално $m_e(V_k)$ приказани су на слици 72.



Сл. 72. Дијаграм експерименталне зависности масе експлозива m_e и запремине кратера V_k и апроксимација функције $M_e(V_k)$ при површинској експлозији ТНТ на земљи са каменчићима

За случај да се експлозија пентрита догодила на земљи са каменчићима, потребни подаци за добијање зависности $M_e(V_k)$ дати су у табелама 56 и 57.

Табела 56. Вредности $Y=ln(m_e)$, $X=ln(V_k)$, X^2, XY, апроксимиране функције - M_e и одступања од експериментално добијених вредности m_e-M_e (пентрит - земља са каменчићима)

m_e	V_k	$Y=ln(m_e)$	$X=ln(V_k)$	X^2	XY	M_e	$m_e - M_e$
0	0.000000	0	0	0	0	0	0
0.125	0.003942	-2.07944	-5.53596	30.64683	11.51170	0.12500	0.00000
0.15	0.006927	-1.89712	-4.97230	24.72375	9.43305	0.15000	0.00000
SUMA:	0.011	-3.977	-10.508	55.371	20.945	-	-

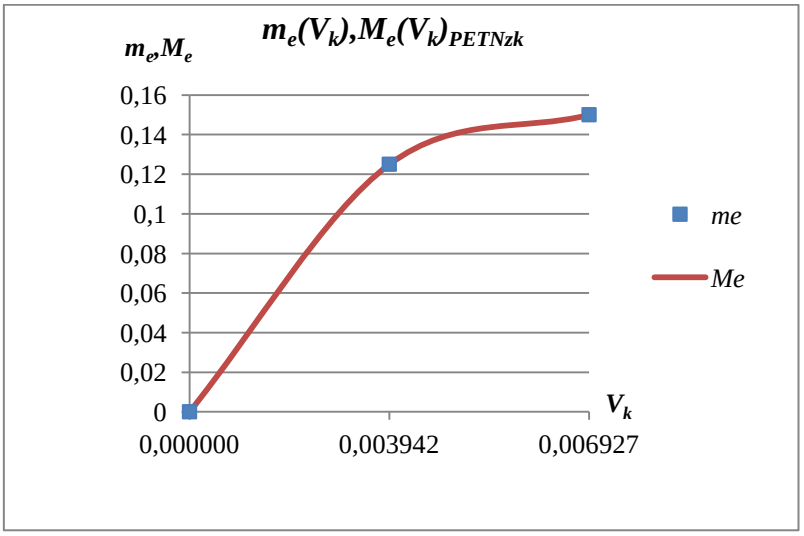
Табела 57. Вредности детерминанти *D, Da, Db* и коефицијената *A, B* и *a* у случају експлозије пентрита на земљи са каменчићима

N	2
D	0.317712
Da	-0.091749
Db	0.102767
A	-0.288779
B	0.323460
a	0.749178

Апроксимирана функција зависности масе коришћеног експлозива од запремине кратера у случају експлозије пентрита на земљи са каменчићима биће:

$$M_e=0{,}749178V_k^{0.32346} \quad \text{(67)}$$

Дијаграм апроксимиране функције $M_e(V_k)$ и експерименталних података $m_e(V_k)$ експлозије пентрита на земљи са каменчићима приказан је на слици 73.



Сл. 73. Дијаграм експерименталне зависности масе експлозива m_e и запремине кратера V_k и апроксимација функције $M_e(V_k)$ при експлозији пентрита на земљи са каменчићима

За случај експлозије амонекса1 на бетону потребни подаци за добијање зависности $M_e(V_k)$ дати су у табелама 58 и 59.

Табела 58. Вредности $Y=ln(m_e)$, $X=ln(V_k)$, X^2, XY, апроксимиране функције - M_e и одступања од експериментално добијених вредности m_e-M_e у случају експлозије амонекса1 на бетону

m_e	V_k	$Y=ln(m_e)$	$X=ln(V_k)$	X^2	XY	M_e	$m_e - M_e$
0,10	0,00002670	-2,30259	-10,53085	110,89874	24,24817	0,09456	-0,00544
0,20	0,00023876	-1,60944	-8,34005	69,55646	13,42280	0,22618	0,02618
0,50	0,00148000	-0,69315	-6,51571	42,45452	4,51635	0,46754	-0,03246
SUMA:	0,002	-4,605170	-25,386612	222,909719	42,187315	-	-

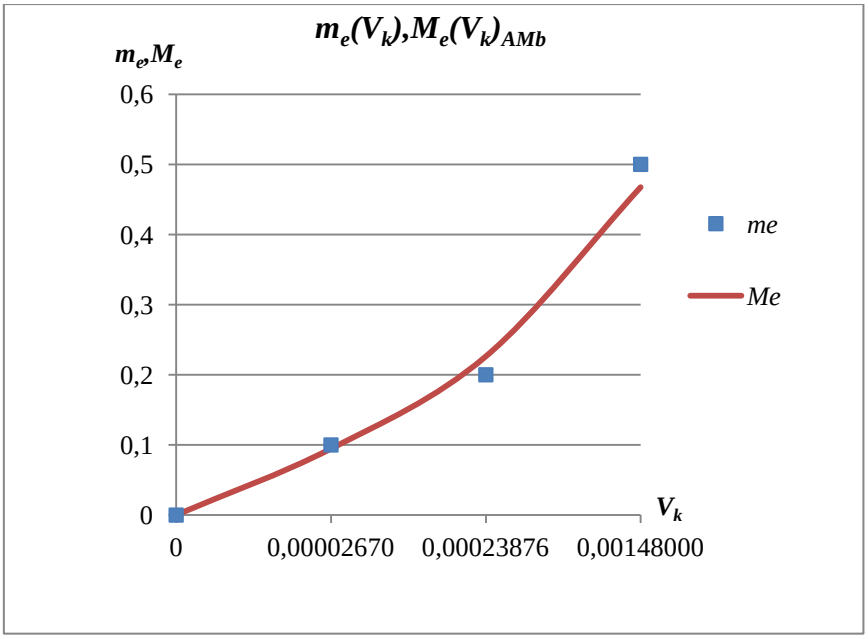
Табела 59. Вредности детерминанти *D, Da, Db* и коефиц. *A, B* и *a* (амонекс1 – бетон)

N	3
D	24,249094
Da	44,455798
Db	9,652277
A	1,833297
B	0,398047
a	6,254475

Апроксимирана функција зависности масе коришћеног експлозива од запремине кратера у случају експлозије амонекса1 на бетону гласи:

$$M_e=6,254475V_k^{0,398047} \quad (68)$$

За експлозију амонекса1 на бетону дијаграми апроксимиране функције $M_e(V_k)$ и функције добијене експериментално $m_e(V_k)$ приказани су на сл. 74.



Сл. 74. Дијаграм експерименталне зависности масе експлозива m_e и запремине кратера V_k и апроксимација функције $M_e(V_k)$ при експлозији амонекса1 на бетону

За експлозију ТНТ на бетону потребни подаци за апроксимацију функције дати су у Табелама 60 и 61.

Табела 60. Вредности $Y=ln(m_e)$, $X=ln(V_k)$, X^2, XY, апроксимиране функције - M_e и одступања од експериментално добијених вредности m_e-M_e у случају експлозије ТНТ на бетону

m_e	V_k	$Y=ln(m_e)$	$X=ln(V_k)$	X^2	XY	M_e	$m_e - M_e$
0	0	0	0	0	0	0	0
0.10	0.0001696	-2.30259	-8.68207	75.37830	19.99120	0.11106	0.01106
0.15	0.0002040	-1.89712	-8.49739	72.20565	16.12057	0.12645	-0.02355
0.20	0.0006020	-1.60944	-7.41525	54.98598	11.93439	0.27058	0.07058
0.40	0.0007500	-0.91629	-7.19544	51.77432	6.59311	0.31580	-0.08420
SUMA:	0.002	-6.725434	-31.790149	254.344246	54.639271		

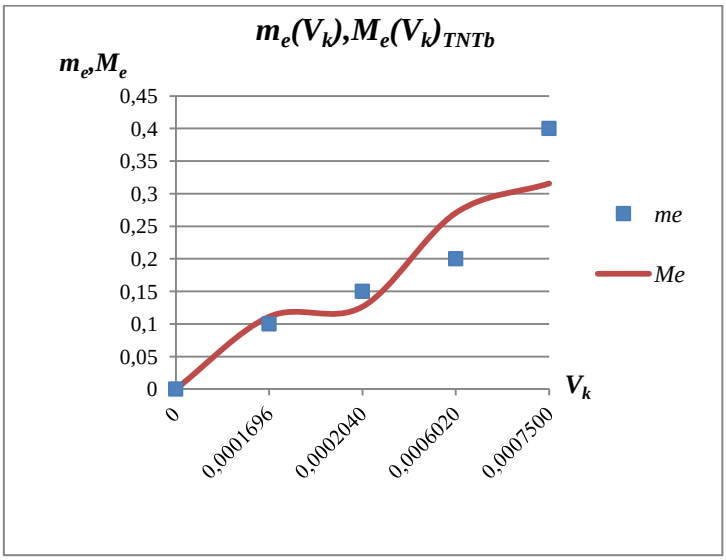
Табела 61. Вредности детерминанти *D, Da, Db* и коефицијената *A, B* и *a* у случају површинске експлозије ТНТ на бетону

N	4
D	6.763418
Da	26.415207
Db	4.754547
A	3.905600
B	0.702980
a	49.679891

Апроксимирана функција зависности масе коришћеног експлозива од запремине кратера у случају површинске експлозије ТНТ на бетону ће гласити:

$$M_e=49{,}679891V_k^{0{,}702980} \quad \text{(69)}$$

За површинску експозију ТНТ на бетону дијаграми апроксимиране функције $M_e(V_k)$ и функције добијене експериментално $m_e(V_k)$ приказани су на сл. 75.



Сл. 75. Дијаграм експерименталне зависности масе коришћеног експлозива m_e и запремине кратера V_k и апроксимација функције $M_e(V_k)$ при експлозији ТНТ на бетону

У случају површинске експлозије пентрита на бетону преглед података потребних за апроксимацију функције дат је у табелама 62 и 63.

Табела 62. Вредности $Y=ln(m_e)$, $X=ln(V_k)$, X^2, XY, апроксимиране функције - M_e и одступања од експериментално добијених вредности m_e-M_e у случају површинске експлозије пентрита на бетону

m_e	V_k	$Y=ln(m_e)$	$X=ln(V_k)$	X^2	XY	M_e	$m_e - M_e$
0,10	0,000502	-2,30259	-7,59691	57,71305	17,49253	0,09983	-0,00017
0,20	0,001270	-1,60944	-6,66874	44,47207	10,73292	0,22230	0,02230
0,25	0,001290	-1,38629	-6,65311	44,26391	9,22317	0,22532	-0,02468
SUMA:	0,003	-5,298317	-20,918762	146,449033	37,448626	-	-

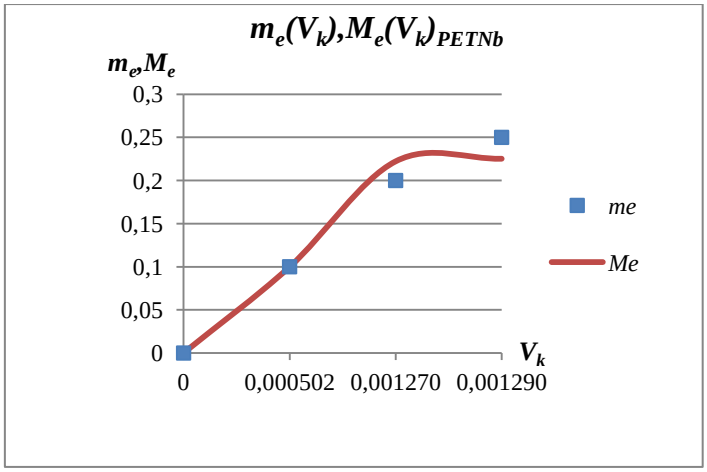
Табела 63. Вредности детерминанти *D, Da, Db* и коефицијената *A, B* и *a* у случају површинске експлозије пентрита на бетону

N	3
D	1,752501
Da	7,445439
Db	1,511639
A	4,248465
B	0,862561
a	69,997868

Апроксимирана функција зависности масе коришћеног експлозива од запремине кратера у случају експлозије пентрита на бетону ће гласити:

$$M_e=69,997868V_k^{0,862561} \quad (70)$$

За површинску експлозију пентрита на бетону дијаграми апроксимиране функције $M_e(V_k)$ и функције добијене експериментално $m_e(V_k)$ приказани су на слици 76.



Сл. 76. Дијаграм експерименталне зависности масе експлозива m_e и запремине кратера V_k и апроксимација функције $M_e(V_k)$ при експлозији пентрита на бетону

У случају експлозије амонекса1 на асфалту преглед података потребних за апроксимацију функције дат је у табелама 64 и 65.

Табела 64. Вредности $Y=ln(m_e)$, $X=ln(V_k)$, X^2, XY, апроксимиране функције - M_e и одступања од експериментално добијених вредности m_e-M_e (амонекс1 – асфалт)

m_e	V_k	$Y=ln(m_e)$	$X=ln(V_k)$	X^2	XY	M_e	$m_e - M_e$
0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.0000502	-2.30259	-9.89950	98.00001	22.79443	0.11908	0.01908
0.2	0.0000864	-1.60944	-9.35652	87.54452	15.05874	0.16067	-0.03933
0.5	0.000733	-0.69315	-7.21836	52.10479	5.00339	0.52267	0.02267
SUMA:	0.001	-4.605170	-26.474383	237.649323	42.856563		

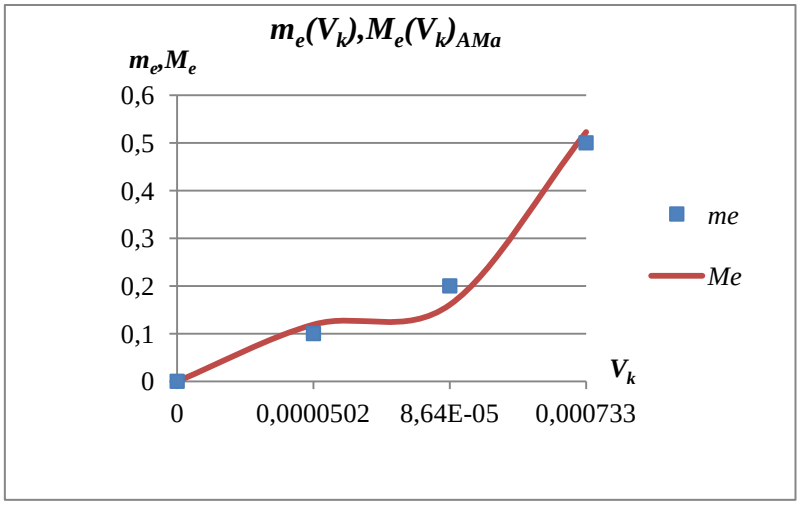
Табела 65. Вредности детерминанти *D, Da, Db* и коефицијената *A, B* и *a* у случају површинске експлозије амонекса1 на асфалту

N	3
D	12.055001
Da	40.185489
Db	6.650648
A	3.333512
B	0.551692
a	28.036632

Апроксимирана функција зависности масе коришћеног експлозива од запремине кратера у случају експлозије амонекса1 на асфалту ће гласити:

$$M_e=28{,}036632V_k^{0{,}551692} \quad \text{(71)}$$

За површинску експозију амонекса1 на асфалту дијаграми апроксимиране функције $M_e(V_k)$ и функције добијене експериментално $m_e(V_k)$ приказани су на сл.77.



Сл. 77. Дијаграм експерименталне зависности масе експлозива m_e и запремине кратера V_k и апроксимација функције $M_e(V_k)$ при експлозији амонекса1 на асфалту

У случају површинске експлозије ТНТ на асфалту потребни подаци за апроксимацију функције $M_e(V_k)$ су дати у табелама 66 и 67:

Табела 66. Вредности $Y=ln(m_e)$, $X=ln(V_k)$, X^2, XY, апроксимиране функције - M_e и одступања од експериментално добијених вредности m_e-M_e (ТНТ – асфалт)

m_e	V_k	$Y=ln(m_e)$	$X=ln(V_k)$	X^2	XY	M_e	$m_e - M_e$
0,1	0,00009529	-2,30259	-9,25859	85,72141	21,31868	0,09984	-0,00016
0,2	0,00074870	-1,60944	-7,19717	51,79929	11,58340	0,28239	0,08239
0,4	0,00075590	-0,91629	-7,18760	51,66161	6,58593	0,28375	-0,11625
SUMA:	0,002	-4,828314	-23,643359	189,182311	39,488016	-	-

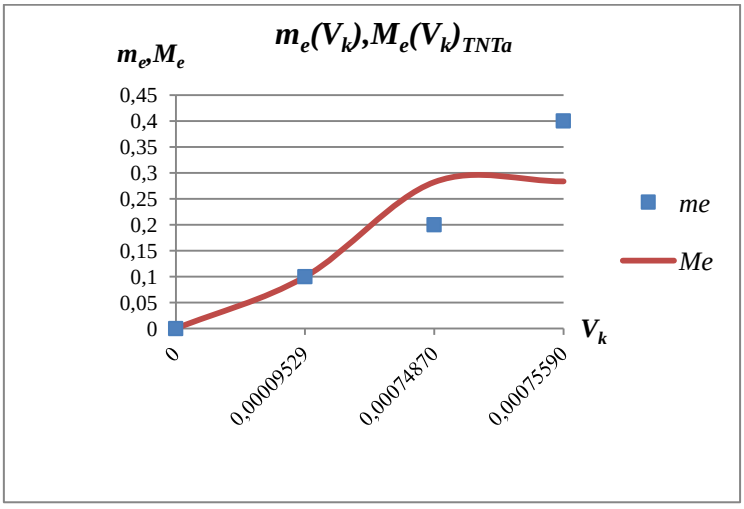
Табела 67. Вредности детерминанти D, D_a, D_b и коефицијената A, B и a у случају експлозије ТНТ на асфалту

N	3
D	8,538493
D_a	20,197794
D_b	4,306491
A	2,365499
B	0,504362
a	10,649349

Апроксимирана функција зависности масе коришћеног експлозива од запремине кратера у случају експлозије ТНТ на асфалту ће гласити:

$$M_e=10{,}649349V_k^{0{,}504362} \quad \text{(72)}$$

За експлозију ТНТ на асфалту дијаграми апроксимиране функције $M_e(V_k)$ и функције добијене експериментално $m_e(V_k)$ приказани су на сл. 78.



Сл. 78. Дијаграм експерименталне зависности масе коришћеног експлозива m_e и запремине кратера V_k и апроксимација функције $M_e(V_k)$ при експлозији ТНТ на асфалту

У случају апроксимације функције за површинску експлозију пентрита на асфалту потребни подаци за апроксимацију функције $M_e(V_k)$ су дати у табелама 68 и 69.

Табела 68. Вредности $Y=ln(m_e)$, $X=ln(V_k)$, X^2, XY, апроксимиране функције - M_e и одступања од експериментално добијених вредности m_e-M_e (пентрит – асфалт)

m_e	V_k	$Y=ln(m_e)$	$X=ln(V_k)$	X^2	XY	M_e	$m_e - M_e$
0,10	0,00037	-2,30259	-7,90201	62,44172	18,19504	0,10000	0,00000
0,25	0,00219	-1,38629	-6,12385	37,50158	8,48946	0,25000	0,00000
0, 50	0,003402	-0,69315	-5,68339	32,30094	3,93943	0,41845	-0,08155
SUMA:	0,003	-3,688879	-14,025861	99,943308	26,684509	-	-

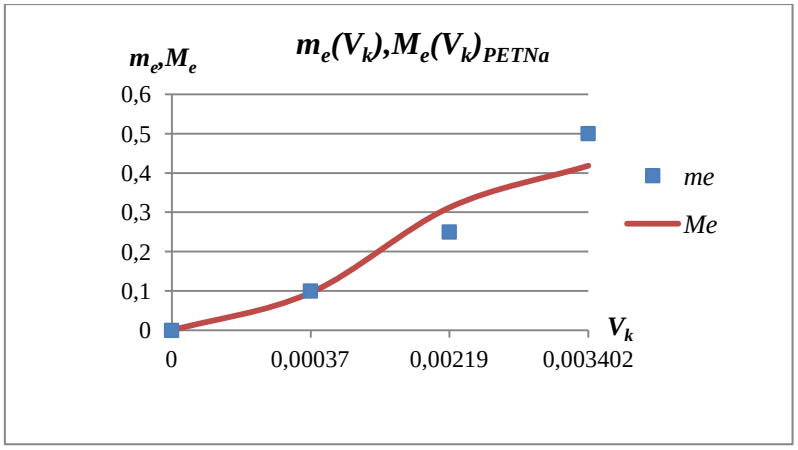
Табела 69. Вредности детерминанти D, D_a, D_b и коефицијената A, B и a у случају експлозије пентрита на асфалту

N	3
D	8,278094
Da	24,077072
Db	5,505335
A	2,908529
B	0,665049
a	18,329809

Апроксимирана функција зависности масе коришћеног експлозива од запремине кратера у случају експлозије пентрита на асфалту ће гласити:

$$M_e=18,329809V_k^{0,665049} \quad \text{..... (73)}$$

За експлозију пентрита на асфалту дијаграми апроксимиране функције $M_e(V_k)$ и функције добијене експериментално $m_e(V_k)$ приказани су на слици 79.



Сл.79. Дијаграм експерименталне зависности масе експлозива m_e и запремине кратера V_k и апроксимација функције $M_e(V_k)$ при експлозији пентрита на асфалту

У табелама 70-80 приказане су вредности прорачунатих маса експлозива према предложеним формулама и то за одређене специфичне случајеве површинских експлозија амонекс1, ТНТ и пентрит на земљи, ТНТ и пентрит на земљи са каменчићима, амонекс1, ТНТ и пентрит на бетону, амонекс1, ТНТ и пентрит на асфалту.

Табела 70. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих вредности $M_e[kg]$ маса експлозива - једначине (63) и (64) са употребом корекционог фактора у односу на ТНТ и вредности апсолутних и релативних одступања за експлозију амонекса1 на земљи

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,09**	**0,1**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**0,25**	**0,5**	**1**	**1**	**1,5**	**2**	**9**
M_e $[kg]$ (63)	0,05439	0,07446	0,19509	0,39339	0,39063	0,47838	0,97447	1,04040	0,58885	1,17087	2,34765	2,86011
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,03561	0,02554	0,00491	0,19339	0,19063	0,22838	0,47447	0,04040	0,41115	0,32913	0,34765	6,13989
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,39567	0,25540	0,02453	0,96695	0,95317	0,91352	0,94894	0,04040	0,41115	0,21942	0,17383	0,68221
M_e $[kg]$ (64)	0,01902	0,03261	0,16997	0,56617	0,55981	0,79249	2,68548	3,00222	1,13181	3,67966	12,13529	17,02698
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,07097	0,06739	0,03003	0,36617	0,36617	0,54248	2,18548	2,00222	0,13181	2,17966	10,13529	8,02698
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,78855	0,67390	0,15015	1,83087	1,83087	2,16992	4,37096	2,00222	0,13181	1,45311	5,06764	0,89188

Табела 71. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих вредности $M_e[kg]$ маса експлозива - једначина (64) и вредности апсолутних и релативних одступања за експлозију ТНТ на земљи

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,18**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**0,36**	**0,54**	**0,54**	**2**	**2**
M_e $[kg]$ (64)	0,06677	0,01580	0,05025	0,24127	0,41157	0,04461	0,41239	0,43375	0,58612	0,58323	0,83038	0,27141
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,03323	0,08419	0,04975	0,06127	0,21157	0,15539	0,21239	0,07375	0,04612	0,04323	1,16962	1,72858
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,33230	0,84190	0,49748	0,34039	1,05785	0,77695	1,06195	1,02048	0,08541	0,08005	0,58481	0,86429

Табела 72. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих вредности $M_e[kg]$ маса експлозива - једначине (65) и (64) са употребом корекционог фактора у односу на ТНТ и вредности апсолутних и релативних одступања за експлозију пентрита на земљи

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,05**	**0,1**	**0,1**	**0,2**	**0,2**	**0,25**	**0,25**	**0,5**	**1**
M_e $[kg]$ (65)	0,04252	0,10288	0,11651	0,26179	0,27493	0.33301	0,10579	0,40884	0,80174
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,00748	0,00288	0,01651	0,06179	0,07493	0,08301	0,14421	0,09116	0,19826
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,14963	0,02883	0,16513	0,30888	0,37466	0,33198	0,57684	0,01823	0,19873
M_e $[kg]$ (64)	0,08650	0,22746	0,26063	0,63191	0,66674	0,82224	0,23451	0,18235	2,14888
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,03650	0,12746	0,16063	0,43191	0,46674	0,57224	0,01549	1,02914	1,14888
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,73004	1,27456	1,60634	2,15957	2,33369	5,72240	0,15492	1,05828	1,14888

Табела 73. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих вредности $M_e[kg]$ маса експлозива - једначина (66) и вредности апсолутних и релативних одступања за експлозију ТНТ на земљи са каменчићима

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,05**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**0,3**
M_e $[kg]$ (66)	0,08726	0,10419	0,14175	0,15281	0,20284	0,15870	0,16385	0,16939
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,03726	0,00419	0,04175	0,05281	0,00284	0,04130	0,03614	0,13061
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,74518	0,04190	0,41754	0,52808	0,01417	0,20649	0,18072	0,43563

Табела 74. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих вредности $M_e[kg]$ маса експлозива - једначине (67) и (66) са употребом корекционог фактора у односу на ТНТ и апсолутна и релативна одступања (пентрит - земља са каменчићима)

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,125**	**0,15**
M_e $[kg]$ (67)	0,1249900	0,1500004
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,0000004	0,0000004
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,0000032	0,0000026
M_e $[kg]$ (66)	0.1246700	0,1496100
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,0003300	0,0003940
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0.0026500	0,0026300

Табела 75. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих вредности $M_e[kg]$ маса експлозива - једначине (68) и (69) са употребом корекционог фактора у односу на ТНТ и апсолутна и релативна одступања (амонекс1 – бетон)

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,1**	**0,2**	**0,5**
M_e $[kg]$ (68)	0,09456	0,22618	0,46754
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,00544	0,02618	0,03246
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,05435	0,13077	0,06491
M_e $[kg]$ (69)	0.04784	0,22312	0,20119
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,05216	0,02312	0,29880
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0.52162	0,11560	0,59760

Табела 76. Упоредни приказ вредности маса експлозива коришћених у експериментима $m_e[kg]$ и прорачунатих вредности M_e $[kg]$ према једначини (69) и вредности апсолутних и релативних одступања (ТНТ – бетон)

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,1**	**0,15**	**0,2**	**0,4**
M_e $[kg]$ (69)	0,11106	0,12645	0,27058	0,31580
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,01106	0,02355	0,07058	0,08420
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,11056	0,01570	0,35292	0,16840

Табела 77. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих вредности $M_e[kg]$ маса експлозива - једначине (70) и (69) са употребом корекционог фактора у односу на ТНТ и апсолутна и релативна одступања (пентрит – бетон)

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,1**	**0,2**	**0,25**
M_e $[kg]$ (70)	0,09983	0,22230	0,22532
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,00017	0,02230	0,02468
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,00174	0,11149	0,09873
$M_e[kg]$ (69)	0,16908	0,32469	0,32827
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,06908	0,12469	0,07827
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,69083	0,62346	0,31311

Табела 78. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих вредности $M_e[kg]$ маса експлозива - једначине (71) и (72) са употребом корекционог фактора у односу на ТНТ и апсолутна и релативна одступања (амонекс1 – асфалт)

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,1**	**0,2**	**0,5**
M_e $[kg]$ (71)	0,11908	0,16067	0,52267
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,01908	0,03933	0,02267
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,19079	0,19665	0,04535
M_e $[kg]$ (72)	0,11417	0,15014	0,44143
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,01417	0,04985	0,05857
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,14176	0,24927	0,11715

Табела 79. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих вредности $M_e[kg]$ маса експлозива - једначина (72) и апсолутна и релативна одступања (ТНТ–асфалт)

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,1**	**0,2**	**0,4**
M_e $[kg]$ (72)	0,09984	0,28239	0,28375
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,00016	0,08239	0,11625
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,00160	0,41193	0,29062

Табела 80. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих вредности $M_e[kg]$ маса експлозива - једначине (73) и (72) са употребом корекционог фактора у односу на ТНТ и апсолутна и релативна одступања (пентрит – асфалт)

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,1**	**0,25**	**0,5**
M_e $[kg]$ (73)	0,09568	0,31219	0,41845
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,00431	0,06219	0,08155
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,04315	0,24876	0,01631
M_e $[kg]$ (72)	0,14051	0,34451	0,43021
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,04051	0,09451	0,06979
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,40512	0,37804	0,13957

7.3 Зависност масе коришћеног експлозива, запремине кратера и контактне површине добијена апроксимацијом криве из експерименталних тачака

Зависност масе експлозива од запремине кратера и контактне површине може се изразити коришћењем димензионе анализе, експерименталних података и апроксимације функције. Претпостављена је функционална зависност запремине кратера облика $V_k = f(P_k, m_e, \rho_{tla})$, односно димензионом анализом дошло се до предлога модела зависности запремине кратера од бездимензионих величина π_1 и π_2 исказаног једначином (48) тј. $f(\pi_1, \pi_2) = 0$, где су $\pi_1 = V_k^{-1} m_e \rho_{tla}^{-1}$ и $\pi_2 = V_k^{-2/3} P_k$, одн. до једначине (49) $V_k^{-1} m_e \rho_{tla}^{-1} = g(V_k^{-2/3} P_k)$, где су f и g функције.

Претпоставићемо линеарну, а затим и зависност у облику степене функције. За линеарну зависност - једначина означена (50) $\boldsymbol{V_k^{-1} m_e \rho_{tla}^{-1} = A + B V_k^{-2/3} P_k}$ (A и B – бездимензиони параметри које налазимо методом најмањих квадрата), вредности параметара потребних за линеарну апроксимацију при површинској експлозији ТНТ на земљи дати су у Табелама 81 и 82.

Табела 81. Вредности потребне за линеарну апроксимацију ф-је $f(\pi_1, \pi_2)=0$, m_e, V_k, P_k, $Y=V_k^{-1}m_e\rho_{tla}^{-1}$, $X=V_k^{-2/3}P_k$, X^2, XY, M_e, $(m_e-M_e)_lin$ (одступање од експерименталне масе експлозива) за експлозију ТНТ на земљи

m_e	V_k	P_k	$Y=m_e/(V_k*Rotla)$	$X=V_k\text{^}(-2/3)*P_k$	$X\text{^}2$	XY	Me	$(m_e-M_e)_lin$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.10	0.0007536	0.003564	0.088464260	0.430371763	0.185219854	0.038072520	0.10591	0.00591
0.18	0.0022440	0.009000	0.053475936	0.525082174	0.275711289	0.028079261	0.41545	0.23545
0.20	0.0035380	0.005000	0.037686075	0.215343344	0.046372756	0.008115445	0.13900	-0.06100
0.36	0.0036930	0.009000	0.064987815	0.376694811	0.141898981	0.024480573	0.42567	0.06567
0.54	0.0047690	0.009000	0.075487524	0.317656413	0.100905597	0.023979096	0.41712	-0.12288
2.00	0.0064110	0.021000	0.207975875	0.608511481	0.370286223	0.126555708	1.43877	-0.56123
SUMA			0.528077484	2.473659985	1.120394699	0.249282602		

Табела 82. Вредности густине тла, броја експерименталних вредности масе експлозива, детерминанти D, D_a и D_b и коефицијената A и B при експлозији ТНТ на земљи

ROtla	1500
N	6
D	0.603374472
Da	-0.024985183
Db	0.189411469
A	-0.041409082
B	0.313920257

Линеарна зависност бездимензионих величина π_1 и π_2, а преко којих је изражена и запремина кратера ће изгледати:

$\pi_1=-0.041409082+0.313920257\pi_2$, …..... (74)

односно

$V_k^{-1}m_e\rho_{tla}^{-1}= - 0{,}041409082+0{,}313920257V_k^{-2/3}P_k$ .....(75)

Како је густина тла у случају површинске експлозије ТНТ на земљи константна величина и износи $1500 kg/m^3$, то ће се зависност $m_e=m(P_k,V_k)$ свести на:

$\boldsymbol{M_e=-62{,}11365V_k+470{,}8803V_k^{1/3}P_k}$ .....(76)

Уколико се претпостави да је зависност између бездимензионих параметара степена функција и изврши апроксимација зависности бездимензионих величина $V_k^{-1}m_{e\ tla}^{-1}=\pi_1$ и $V_k^{-2/3}P_k=\pi_2$ степеном функцијом $\boldsymbol{V_k^{-1}m_{e\ tla}^{-1}=a(V_k^{-2/3}P_k)^b}$ (дато једначином (51) где су a,b – бездимензиони параметри који се налазе методом најмањих квадрата), вредности параметара потребних за апроксимацију зависности запремине кратера од бездимензионих параметара π_1 и π_2 одн. од контактне површине и масе експлозива у случају површинске експлозије ТНТ на земљи дати су у Табелама 83 и 84.

Табела 83. Вредности потребне за линеарну апроксимацију ф-је $f(\pi_1, \pi_2)$=0, m_e, V_k, P_k, $Y=V_k^{-1}m_{e\ tla}^{-1}$, $X=V_k^{-2/3}P_k$, X^2, XY, M_e, $(m_e-M_e)_step$ (одступање од експерименталне масе експлозива) при експлозији ТНТ на земљи

m_e	V_k	P_k	$Y=m_e/(V_k*Rotla)$	$X=V_k\text{^}(-2/3)*P_k$	$X\text{^}2$	XY	Me	$(m_e-M_e)_step$
0	0	0	-	-	-	-	-	-
0.10	0.0007536	0.003564	-2.42516	-0.84311	0.71083	2.04466	0.09498	-0.00502
0.18	0.0022440	0.009000	-2.92852	-0.64420	0.41499	1.88656	0.35406	0.17406
0.20	0.0035380	0.005000	-3.27846	-1.53552	2.35783	5.03415	0.20397	0.00397
0.36	0.0036930	0.009000	-2.73356	-0.97632	0.95320	2.66882	0.40041	0.04041
0.54	0.0047690	0.009000	-2.58379	-1.14678	1.31512	2.96305	0.42652	-0.11348
2.00	0.0064110	0.021000	-1.57033	-0.49674	0.24675	0.78005	1.19486	-0.80514
-			-15.519821	-5.642672	5.998715	15.377294		

Табела 84. Вредности густине тла, броја експерименталних вредности масе експлозива, детерминанти D, D_a и D_b и коефицијената A, B и a у случају експлозије ТНТ на земљи

ROtla	1500
N	6
D	4.152538
Da	-6.329952
Db	4.690495
A	-1.524358
B	1.129549
a	0.217761

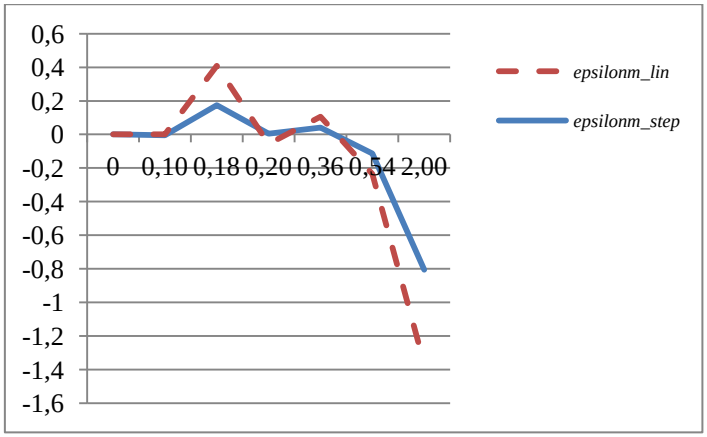
Степена зависност запремине кратера од бездимензионих величина π_1 и π_2 биће:

$$V_k^{-1}m_{e\ tla}^{-1}= 0.217761(V_k^{-2/3}P_k)^{1,129549} \quad \text{..... (77)}$$

Заменом вредности густине тла и сређивањем једначине добија се зависност $M_e=m(P_k,V_k)$ облика:

$$M_e=326{,}6415V_k^{0{,}2469675}P_k^{1{,}129549} \quad \text{(78)}$$

Одступања вредности масе експлозива добијена линеарном (*epsilonm_lin*) и степеном (*epsilonm_step*) апроксимацијом су поређена у смислу која апроксимација даје мања одступања од експерименталних података. Вредности одступања дата су на сл. 80.



Сл. 80. Одступања између вредности масе експлозива добијене линеарном (*epsilonm_lin*) и степеном (*epsilonm_step*) апроксимацијом функције $M_e(V_k,P_k)$

Са слике 80. очигледно је да линеарна апроксимација даје већа одступања, те је прихватљивија степена зависност између бездимензионих параметара π_1 и π_2, одн. посредно масе експлозива, запремине кратера и контактне површине.

Иако се зависност масе коришћеног експлозива при експлозији било ког бризантног експлозива може исказати ТНТ еквивалентом, експериментални подаци експлозија амонекса1 и пентрита на различитим подлогама биће искоришћени за зависност масе експлозива од запремине кратера и контактне површине између експлозивног пуњења. С обзиром на одступања у случају експлозије ТНТ на земљи, као резултат овог истраживања биће предложена само зависност у облику степене функције. У Табелама

85 и 86 дате су вредности коефицијената потребних за апроксимацију функције која даје зависност између масе експлозива, контактне површине и запремине кратера насталог експлозијом амонекса1 на земљи, док су у Табелама 87 и 88 дате вредности коефицијената за случај експлозије ТНТ на земљи са каменчићима.

Табела 85. Вредности потребне за степену апроксимацију функције $f(\pi_1, \pi_2)=0$, m_e , V_k, P_k, $Y=ln(V_k^{-1}m_{e\ tla}^{-1})$, $X=V_k^{-2/3}P_k$, X^2, XY, M_e, $(m_e-M_e)_step$ (одступање од експерименталне вредности масе експлозива) при експлозији амонекса1 на земљи

m_e	V_k	P_k	$Y=ln(m_e/(V_k*Rotla))$	$X=ln(V_k\text{^}(-2/3)*P_k)$	$X\text{^}2$	XY	M_e	$(m_e- M_e)_step$
0	0	0.00	0	0	0	0	0	0
0.09	0.0001759	0.00364	-1.07557	0.14796	0.02189	-0.15914	0.04896	-0.04104
0.10	0.0002780	0.00434	-1.42792	0.01871	0.00035	-0.02672	0.06736	-0.03264
0.20	0.0031420	0.008	-3.15976	-0.98638	0.97295	3.11674	0.25890	0.05890
0.25	0.0041780	0.006	-3.22159	-1.46405	2.14343	4.71656	0.20620	-0.04380
0.50	0.0117800	0.0095	-3.56502	-1.69556	2.87493	6.04471	0.45348	-0.04652
1.00	0.0129590	0.015	-2.96726	-1.30240	1.69623	3.86454	0.76072	-0.23928
1.50	0.0153930	0.0315	-2.73391	-0.67521	0.45590	1.84595	1.77126	0.27126
2.00	0.0424120	0.042	-3.45975	-1.06320	1.13040	3.67842	3.21825	1.21825
9.00	0.0565480	0.189	-2.24333	0.24910	0.06205	-0.55882	17.54522	8.54522
SUMA:			-23.854105	-6.771025	9.358148	22.522239		

Табела 86. Вредности густине тла, броја експерименталних вредности масе експлозива, детерминанти D, D_a и D_b и коефицијената A , B и a за добијање функције степене апроксимације зависности m_e,V_k, P_k у случају експлозије амонекса1 на земљи

ROtla	1500
N	9
D	38.376560
Da	-70.731625
Db	41.183410
A	-1.843094
B	1.073140
a	0.158327

Зависност масе експлозива, контактне површине и запремине кратера у случају експлозије амонекса1 на земљи ће гласити:

$V_k^{-1} m_e \rho_{tla}^{-1} = 0.158327 (V_k^{-2/3} P_k)^{1,07314}$ ..... (79)

што након сређивања даје зависност облика:

$\boldsymbol{M_e = 237,4905 V_k^{0,284573} P_k^{1,07314}}$ ..... (80)

Табела 87. Вредности потребне за добијање степене апроксимације функције $f(\pi_1, \pi_2)=0$, m_e , V_k, P_k, $Y=ln(V_k^{-1} m_{e\ tla}^{-1})$, $X=V_k^{-2/3} P_k$, X^2, XY, M_e, $(m_e-M_e)_step$ (одступање од експерименталне вредности масе експлозива) при експлозији ТНТ на земљи са каменчићима

m_e	V_k	P_k	$Y=ln(m_e/(V_k*Rotla))$	$X=ln(V_k^{(-2/3)}*P_k)$	X^2	XY	M_e	$(m_e-M_e)_step$
0	0.000000	0.00	0	0	0	0	0	0
0.05	0.000454	0.000625	-2.78484	-2.24609	5.04493	6.25501	0.05403	0.00403
0.1	0.000785	0.000625	-2.63987	-2.61154	6.82013	6.89412	0.07614	-0.02386
0.2	0.002884	0.00125	-3.24747	-2.78556	7.75932	9.04600	0.25356	0.05356
0.3	0.003528	0.00125	-3.04349	-2.91988	8.52570	8.88662	0.28763	-0.01237
SUMA:	-	-	-11.715668	-10.563066	28.150080	31.081753		

Табела 88. Вредности густине тла, броја експерименталних вредности масе експлозива, детерминанти D, D_a и D_b и коефицијената A и B потребне за добијање ф-је степене апроксимације зависности m_e,V_k, P_k при експлозији ТНТ на земљи са каменчићима

ROtla	1784
N	4
D	1.021964
Da	-1.478385
Db	0.573645
A	-1.446612
B	0.561316
a	0.235366

Зависност масе експлозива, контактне површине и запремине кратера у случају површинске експлозије ТНТ на земљи са каменчићима ће гласити:

$V_k^{-1} m_e \rho_{tla}^{-1} = 0,235366 (V_k^{-2/3} P_k)^{0,561316}$ ..... (81)

што након сређивања даје зависност:

$$M_e=419{,}892V_k^{0{,}6257893}P_k^{0{,}561316} \quad \text{.....} \quad (82)$$

У Табелама 89 и 90 дате су вредности коефицијената потребних за апроксимацију функције зависности масе експлозива, контактне површине и запремине кратера насталог површинском експлозијом ТНТ, а у Табелама 91 и 92 вредности коефицијената за експлозију амонекса1 на бетону.

Табела 89. Вредности потребне за степену апроксимацију функције $f(\pi_1, \pi_2)=0$, m_e , V_k, P_k, $Y=ln(V_k^{-1}m_{e\ tla}^{-1})$, $X=V_k^{-2/3}P_k$, X^2, XY, M_e, $(m_e-M_e)_step$ (одступање од експерименталне вредности масе експлозива) при експлозији ТНТ на бетону

m_e	V_k	P_k	$Y=ln(m_e/(V_k*Rotla))$	$X=ln(V_k\text{^}(-2/3)*P_k)$	$X\text{^}2$	XY	M_e	$(m_e-M_e)_step$
0	0	0.00	0	0	0	0	0	0
0.10	0.0001696	0.00356	-0.99828	0.15005	0.02252	-0.14979	0.09587	-0.00413
0.15	0.0002400	0.00535	-0.94001	0.32592	0.10623	-0.30637	0.14700	-0.00300
0.20	0.0006020	0.005	-1.57194	-0.35482	0.12589	0.55775	0.27031	0.07031
0.40	0.0007500	0.005	-1.09861	-0.50136	0.25136	0.55080	0.31499	-0.08501
SUMA			-4.608839	-0.380202	0.505995	0.652388		

Табела 90. Вредности густине тла, броја експерименталних вредности масе експлозива, детерминанти D, D_a и D_b и коефицијената A, B и a потребне за добијање функције степене апроксимације зависности m_e,V_k, P_k при експлозији ТНТ на бетону

ROtla	1600
N	4
D	1.879428
Da	-2.084013
Db	0.857263
A	-1.108855
B	0.456130
a	0.329937

Зависност масе експлозива, контактне површине и запремине кратера у случају површинске експлозије ТНТ на подлози од бетона ће гласити:

$V_k^{-1} m_e \rho_{tla}^{-1} = 0.329937 (V_k^{-2/3} P_k)^{0,45613}$ ..... (83)

што након сређивања даје зависност облика:

$\boldsymbol{M_e = 543.497 V_k^{0,6959134} P_k^{0,45613}}$ ..... (84)

Табела 91. Вредности потребне за степену апроксимацију функције $f(\pi_1, \pi_2)=0$, m_e , V_k, P_k, $Y=ln(V_k^{-1} m_{e\ tla}^{-1})$, $X=V_k^{-2/3} P_k$, X^2, XY, M_e, $(m_e-M_e)_step$ (одступање од експерименталне вредности масе експлозива) у случају експлозије амонекса1 на бетону

m_e	V_k	P_k	$Y=ln(m_e/(V_k*Rotla))$	$X=ln(V_k\text{^}(-2/3)*P_k)$	$X\text{^}2$	XY	M_e	$(m_e-M_e)_step$
0	0	0.00	0	0	0	0	0	0
0.1	0.00002670	0.00434	0.85050	1.58068	2.49856	1.34438	0.02879	-0.07121
0.2	0.00023876	0.0868	-0.64715	3.11589	9.70874	-2.01643	0.41001	0.21001
0.5	0.00148000	0.0078	-1.55519	-0.50982	0.25992	0.79287	0.84706	0.34706
SUMA	-	-	-1.351835	4.186747	12.467225	0.120819		

Табела 92. Вредности густине тла, броја експерименталних вредности масе експлозива, детерминанти D, D_a и D_b и коефицијената A, B и a потребних за функцију степене апроксимације зависности m_e,V_k, P_k при експлозији амонекса1 на бетону

ROtla	1600
N	3
D	19.872825
Da	-17.359468
Db	6.022247
A	-0.873528
B	0.303039
a	0.417476

Зависност масе експлозива, контактне површине и запремине кратера при експлозији амонекса1 на бетону ће гласити:

$V_k^{-1} m_e \rho_{tla}^{-1} = 0,417476 (V_k^{-2/3} P_k)^{0,303039}$ ..... (85)

што након сређивања даје зависност облика:

$$M_e = 667.962 V_k^{0,797914} P_k^{0,303039} \quad \text{.....} \quad (86)$$

У Табелама 93 и 94 дате су вредности коефицијената потребних за апроксимацију функције зависности масе експлозива, контактне површине и запремине кратера насталог експлозијом ТНТ, а у Табелама 95 и 96 вредности коефицијената за експлозију амонекса1 на асфалту.

Табела 93. Вредности потребне за степену апроксимацију функције $f(\pi_1, \pi_2)=0$, m_e , V_k, P_k, $Y=ln(V_k^{-1} m_{e\ tla}^{-1})$, $X=V_k^{-2/3} P_k$, X^2, XY, M_e, $(m_e-M_e)_step$ (одступање од експерименталне вредности масе експлозива) при експлозији ТНТ на асфалту.

m_e	V_k	P_k	$Y=ln(m_e/(V_k*Rotla))$	$X=ln(V_k^{(-2/3)}*P_k)$	X^2	XY	M_e	$(m_e-M_e)_step$
0	0	0.00	0	0	0	0	0	0
0.1	0.00009529	0.003564	-0.64490	0.53552	0.28678	-0.34536	0.09979	-0.00021
0.2	0.00074870	0.005	-2.01317	-0.50020	0.25020	1.00699	0.28268	0.08268
0.4	0.00075590	0.005	-1.32959	-0.50658	0.25663	0.67355	0.28361	-0.11639
SUMA	-	-	-3.987662	-0.471267	0.793609	1.335184		

Табела 94. Вредности густине тла, броја експерименталних вредности масе експлозива, детерминанти D, D_a и D_b и коефицијената A, B и a потребне за добијање функције степене апроксимације зависности m_e,V_k, P_k при експлозији ТНТ на асфалту

ROtla	2000
N	3
D	2.158735
Da	-2.535417
Db	2.126297
A	-1.174492
B	0.984974
a	0.308976

Зависност масе експлозива, контактне површине и запремине кратера у случају експлозије ТНТ на асфалту ће гласити:

$V_k^{-1} m_e \rho_{tla}^{-1} = 0{,}308976 (V_k^{-2/3} P_k)^{0{,}984974}$ ..... (87)

што након сређивања даје зависност облика:

$\boldsymbol{M_e = 617{,}952 V_k^{0{,}3433506} P_k^{0{,}984974}}$ ..... (88)

Табела 95. Вредности потребне за степену апроксимацију функције $f(\pi_1, \pi_2)=0$, m_e , V_k, P_k, $Y=ln(V_k^{-1} m_{e\ tla}^{-1})$, $X=V_k^{-2/3} P_k$, X^2, XY, M_e, $(m_e-M_e)_step$ (одступање од експерименталне вредности масе експлозива) при експлозији амонекса1 на асфалту.

m_e	V_k	P_k	$Y=ln(m_e/(V_k*Rotla))$	$X=ln(V_k^{(-2/3)}*P_k)$	X^2	XY	M_e	$(m_e-M_e)_step$
0	0	0.00	0	0	0	0	0	0
0.1	0.0000502	0.00434	-0.00399	1.15978	1.34510	-0.00463	0.12453	0.02453
0.2	0.0000864	0.00434	0.14618	0.79780	0.63649	0.11662	0.14329	-0.05671
0.5	0.000733	0.009	-1.07568	0.10171	0.01035	-0.10941	0.56042	0.06042
SUMA:	-	-	-0.933494	2.059296	1.991928	0.002584		

Табела 96. Вредности густине тла, броја експерименталних вредности масе експлозива, детерминанти D, D_a и D_b и коеф. A, B и a потребних за функцију степене апроксимације зависности m_e,V_k, P_k при експлозији амонекса1 на асфалту

ROtla	2000
N	3
D	1.735083
Da	-1.864775
Db	1.930093
A	-1.074747
B	1.112393
a	0.341384

Зависност масе експлозива, контактне површине и запремине кратера у случају површинске експлозије амонекса1 на подлози од асфалта ће гласити:

$V_k^{-1} m_e \rho_{tla}^{-1} = 0{,}341384 (V_k^{-2/3} P_k)^{1{,}112393}$ ..... (89)

што након сређивања даје зависност облика:

$\boldsymbol{M_e = 682.768 V_k^{0{,}258405} P_k^{1{,}112393}}$ ..... (90)

У табелама 97-103 приказане су вредности прорачунатих маса експлозива према предложеним формулама и то за одређене специфичне случајеве површинских експлозија амонекс1, ТНТ и пентрит на земљи, ТНТ на земљи са каменчићима, амонекс1, ТНТ и пентрит на бетону, амонекс1 и ТНТ на асфалту.

Табела 97. Упоредни приказ вредности маса експлозива коришћених у експериментима m_e [kg] и прорачунатих вредности M_e [kg] према једначинама (80) и (78) са употребом корекционог фактора у односу на ТНТ заједно са вредностима апсолутних и релативних одступања у случају експлозије амонекса1 на земљи

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,09**	**0,1**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**0,25**	**0,5**	**1**	**1**	**1,5**	**2**	**9**
M_e [kg] (80)	0,04896	0,06736	0,21129	0,80881	0,28177	0,20620	0,45348	0,76072	0,86209	1,77126	3,21825	17,54522
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ [kg]	0,04104	0,03264	0,01129	0,60881	0,08177	0,04380	0,04652	0,23928	0,13790	0,27126	1,21825	8,54522
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,45600	0,32640	0,05646	3,04405	0,40886	0,17520	0,09304	0,23928	0,13790	0,18084	0,60913	0,94947
M_e [kg] (78)	0,00176	0,14654	0,45341	0,53217	0,58207	0,41257	0,89558	1,53603	1,83028	3,70531	7,00239	38,11667
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ [kg]	0,08824	0,04654	0,25341	0,33217	0,38207	0,16257	0,39558	0,53603	0,83028	2,20531	5,00237	29,11667
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,98046	0,46540	1,26705	1,66085	1,91035	0,65028	0,79116	0,53603	0,83028	1,47021	3,50119	3,23518

Табела 98. Упоредни приказ вредности маса експлозива коришћених у експериментима m_e [kg] и прорачунатих вредности M_e [kg] према једначини (78) и вредности апсолутних и релативних одступања у случају експлозије ТНТ на земљи

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,18**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**0,36**	**0,54**	**0,54**	**2**	**2**
M_e [kg] (78)	0,09498	0,01399	0,06049	0,35406	0,20397	0,04719	0,09318	0,40041	0,42652	1,47372	1,19487	0,13907
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ [kg]	0,00502	0,08600	0,03951	0,17406	0,00397	0,15281	0,10681	0,04041	0,11348	0,93372	0,80513	1,86093
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,0502	0,86002	0,39508	0,96700	0,01985	0,76404	0,53406	0,11226	0,21016	1,72911	0,40256	0,93046

Табела 99. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих $M_e[kg]$ маса експлозива према (82), апсолутна и релативна одступања (ТНТ - земља с каменчићима)

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,05**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**0,3**
M_e $[kg]$ (82)	0,05403	0,07614	0,30072	0,23566	0,88749	0,25355	0,39801	0,28763
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,00403	0,02386	0,20072	0,13566	0,68749	0,05355	0,19801	0,01237
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,08060	0,23863	2,00722	1,35658	3,43745	0,26776	0,99005	0,04124

Табела 100. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих $M_e[kg]$ маса експлозива према једначинама (86) и (84) са употребом корекционог фактора у односу на ТНТ и апсолутна и релативна одступања (амонекс1 - бетон)

$\boldsymbol{m_e}$	**0,1**	**0,2**	**0,5**
M_e (86)	0,02882	0,41013	0,84838
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,07119	0,21013	0,34838
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,71188	1,05064	0,69676
M_e (84)	0,04579	0,21068	0,98131
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,05420	0,01068	1,96262
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,54202	0,05339	3,92524

Табела 101. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих $M_e[kg]$ маса експлозива према једначини (84) и апсолутна и релативна одступања (ТНТ - бетон)

$\boldsymbol{m_e}[kg]$	**0,1**	**0,15**	**0,2**	**0,4**
M_e $[kg]$ (84)	0,09592	0,14700	0,27031	0,31557
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert$ $[kg]$	0,00408	0,00299	0,07031	0,08443
$\lvert m_e\text{-}M_e\rvert/m_e$	0,04080	0,01998	0,70308	0,21107

Табела 102. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих $M_e[kg]$ маса експлозива према једначинама (90) и (88) са употребом корекционог фактора у односу на ТНТ и апсолутна и релативна одступања (амонекс1 - асфалт)

m_e	**0,1**	**0,2**	**0,5**
M_e (90)	0,12453	0,14329	0,56042
$\|m_e\text{-}M_e\|$ $[kg]$	0,02453	0,05671	0,06042
$\|m_e\text{-}M_e\|/m_e$	0,24529	0,28356	0,12084
M_e (88)	0,15361	0,18509	0,79109
$\|m_e\text{-}M_e\|$ $[kg]$	0,05361	0,01490	0,29109
$\|m_e\text{-}M_e\|/m_e$	0,53614	0,07451	0,58218

Табела 103. Упоредни приказ експерименталних $m_e[kg]$ и прорачунатих $M_e[kg]$ маса експлозива према једначини (88) и апсолутна и релативна одступања (ТНТ – асфалт)

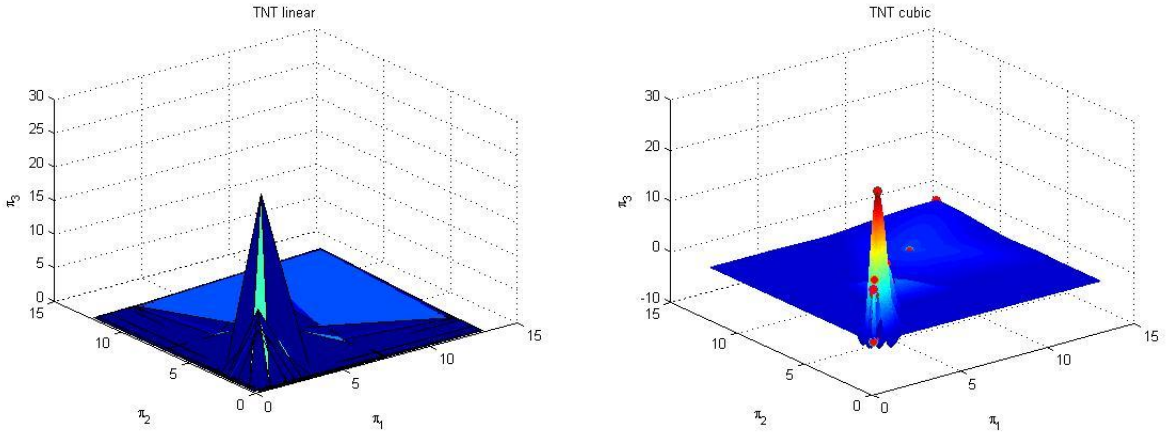
$m_e[kg]$	**0,1**	**0,2**	**0,4**
M_e $[kg]$ (88)	0,09979	0,28268	0,28361
$\|m_e\text{-}M_e\|$ $[kg]$	0,00021	0,08268	0,11639
$\|m_e\text{-}M_e\|/m_e$	0,00208	0,41339	0,29098

7.4 Интерполација карактеристика кратера у програму MATLAB

MATLAB је интегрирано прорачунско окружење које комбинује нумеричке прорачуне, напредну графику и визуелизацију, са вишим програмским језиком. Овај софтверски пакет се може користити у веома широком опсегу, између осталог и за нумеричко решавање инжињерских проблема. Функцију задату табелом $(x_i,f(x_i))$, $i=0,1,...,n$ није практично апроксимирати на целом интервалу $[x_0, x_n]$ једним интерполационим полиномом степена n, изузимајући мале табеле ($n\leq 3$). Тако се намеће идеја да се интервал $[x_0, x_n]$ подели на подинтервале и на сваком од њих функција апроксимира интерполационим полиномом ниског степена. Таква интерполација, са различитим интерполационим полиномима у појединим подинтервалима је писвајз (*piecewise*)

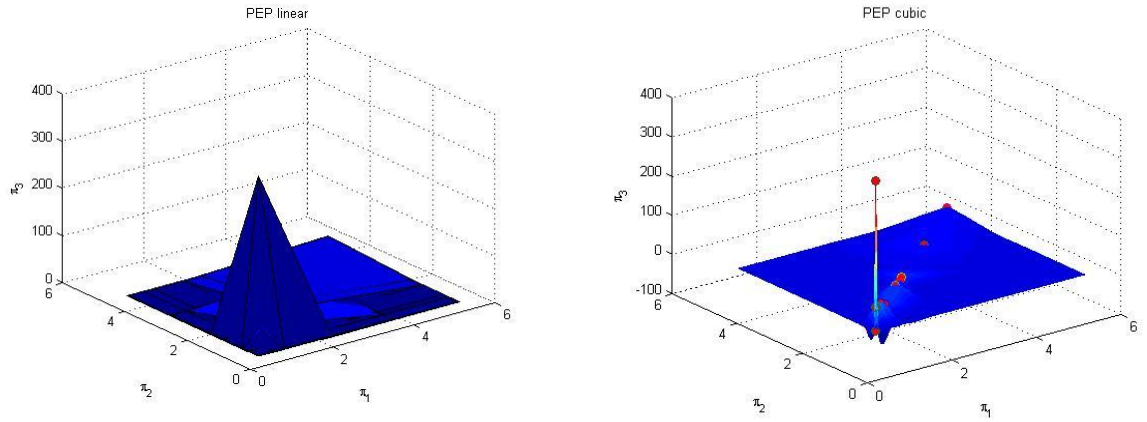
интерполација. У свакој од тачака које су заједничке за два суседна подинтервала, два различита „суседна“ интерполациона полинома имају једнаке вредности, али први извод у тој тачки није непрекидан, јер има једну вредност са леве стране а другу вредност са десне стране те тачке. Стога, крива састављена на интервалу $[x_0, x_n]$ од делова различитих полинома није глатка. Да би оваква крива била глатка, неопходно је додати услов континуитета првог извода. Таква интерполација, код које крива добијена писвајз интерполацијом на интервалу $[x_0, x_n]$ има непрекидне изводе је сплајн интерполација (*spline interpolation*). Функција састављена из интерполационих полинома степена *m,* за поједине подинтервале интервала $[x_0, x_n]$, која задовољава услов континуитета извода до неког реда зове се сплајн степена *m.* Ако је $m=1$, у питању је линеарни сплајн, а ако је $m=3$, у питању је кубни сплајн. У случају линеарног сплајна кроз свака 2 суседна интерполациона чвора од укупно $(n+1)$ чворова на интервалу $[x_0, x_n]$, провлачи се полином првог степена док се у случају кубног сплајна кроз свака 2 суседна интерполациона чвора на интервалу $[x_0, x_n]$, провлачи полином трећег степена. Употреба полинома у изради емпиријског модела који обухватају тренд података су пожељни јер су полиноми лаки за интеграцију и диференцијацију. Када је x у интервалу $x_1 \ x<x_2$ модел који се користи је линеарни сплајн ($S_1(x)$) који пролази кроз тачке (x_1,y_1) и (x_2,y_2): $S_1(x)=a_1+b_1x$, за x из $[x_1, x_2)$. (*linear spline interpolation*). Полиноми вишег реда теже да осцилују поред крајњих тачака интервала у коме су подаци и коефицијенти могу бити осетљиви на мале промене података. Све док подаци нису по својој природи квадратни или кубни, равнање са полиномима нижег реда може довести до слабог поклапања и понегде ван опсега података. Због тога се користи техника кубне сплајн интерполације (*cubic spline interpolation*). Експерименталне вредности запремина кратера у случају површинских експлозија пуњења различитих маса (бризантни експлозиви ТНТ, пентрит и амонекс1) на различитим подлогама (земља, бетон и асфалт) послужили су за моделирање линеарном и кубном сплајн интерполацијом коришћењем MATLAB функције *griddata*. Добијена је функционална зависност запремине кратера од бездимензионих параметара π_1 и π_2 , а према једначини (40) која је приказана графички. Тако на сликама 81, 82 и 83 графички су приказане зависности запремине кратера од величина π_1 и π_2 при експлозији ТНТ, пентрита и амонекса1 на земљи, слика 84 приказује зависност запремине кратера од бездимензионих величина π_1 и π_2 при експлозији ТНТ на земљи са каменчићима, на сликама 85, 86 и 87 приказане су зависности запремине кратера од

величина π_1 и π_2 при експлозији ТНТ, пентрита и амонекса1 на бетону и на сликама 86, 87 и 88 приказане су зависности запремине кратера од величина π_1 и π_2 при експлозији ТНТ, пентрита и амонекса1 на асфалту. У Прилогу 2 је дат MATLAB Code за случајеве експлозија амонекса1, ТНТ и пентрита на земљи, земљи са каменчићима, бетону и асфалту.



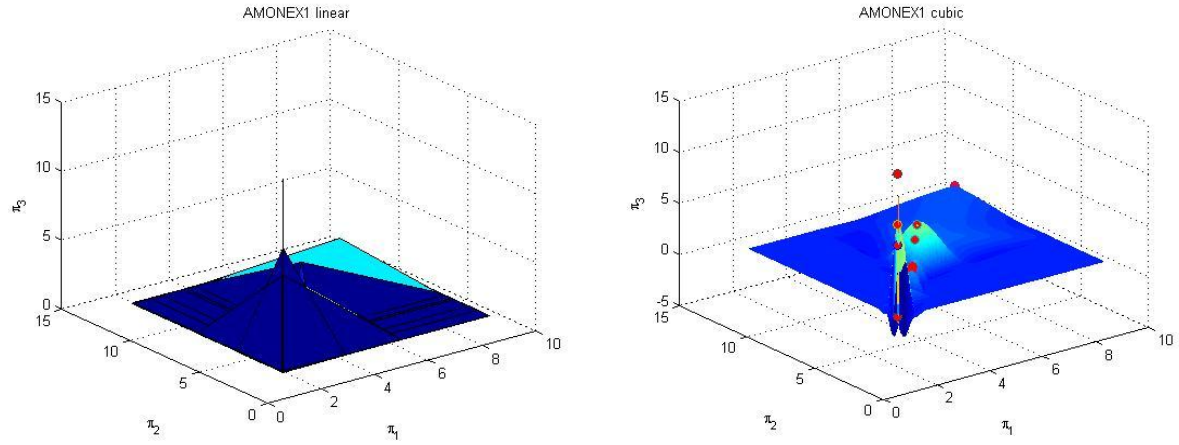
(а) (б)

Сл. 81. Зависност запремине кратера од бездимензионих величина π_1 и π_2 при експлозији ТНТ на земљи (линеарна интерполација – (а) и кубна интерполација – (б))



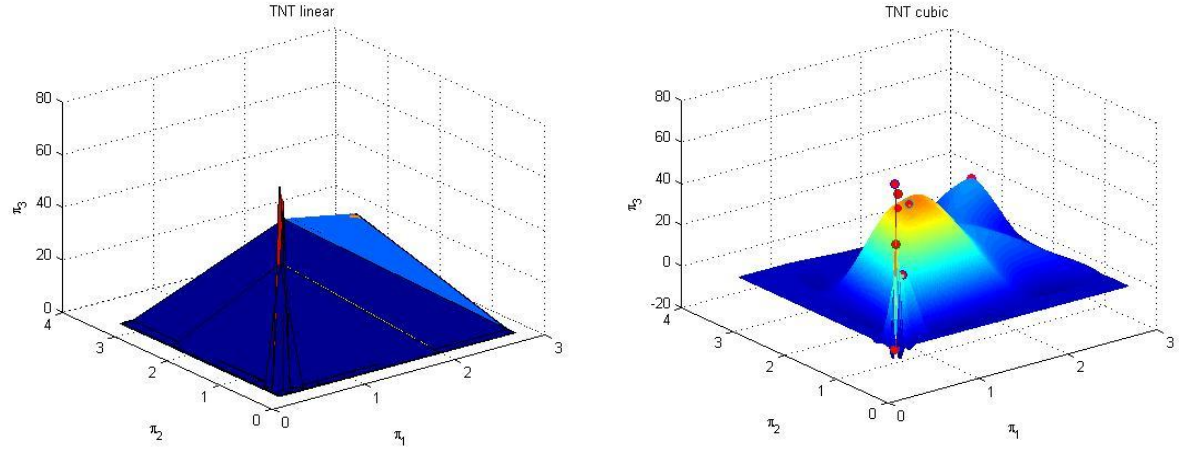
(а) (б)

Сл. 82. Зависност запремине кратера од бездимензионих величина π_1 и π_2 за случај експлозије пентрита на земљи (линеарна интерполација–(а) и кубна интерполација–(б))



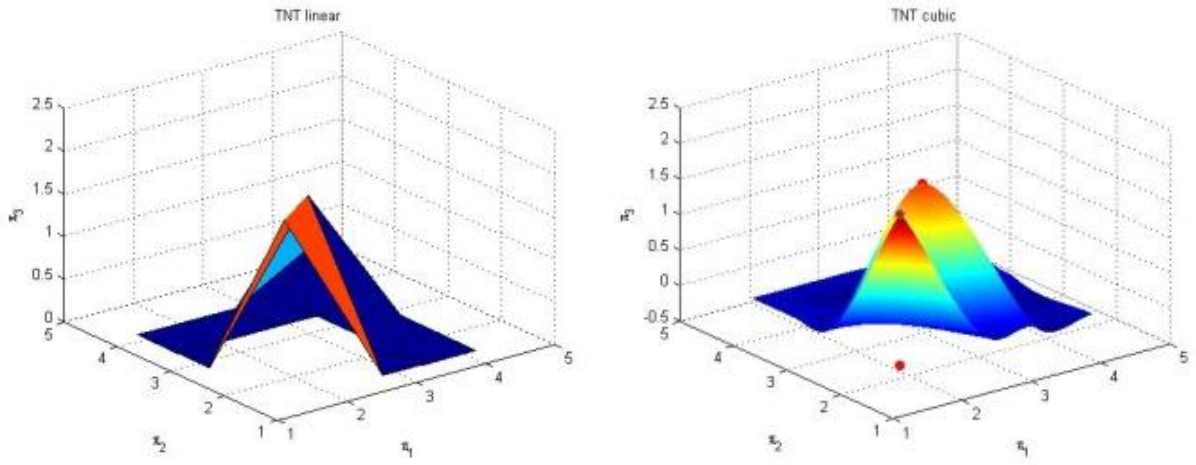
(а) (б)

Сл. 83. Зависност запремине кратера од бездимензионих величина π_1 и π_2 за случај експлозије амонекс1 на земљи (линеарна интерполација–(а) и кубна интерполација–(б))



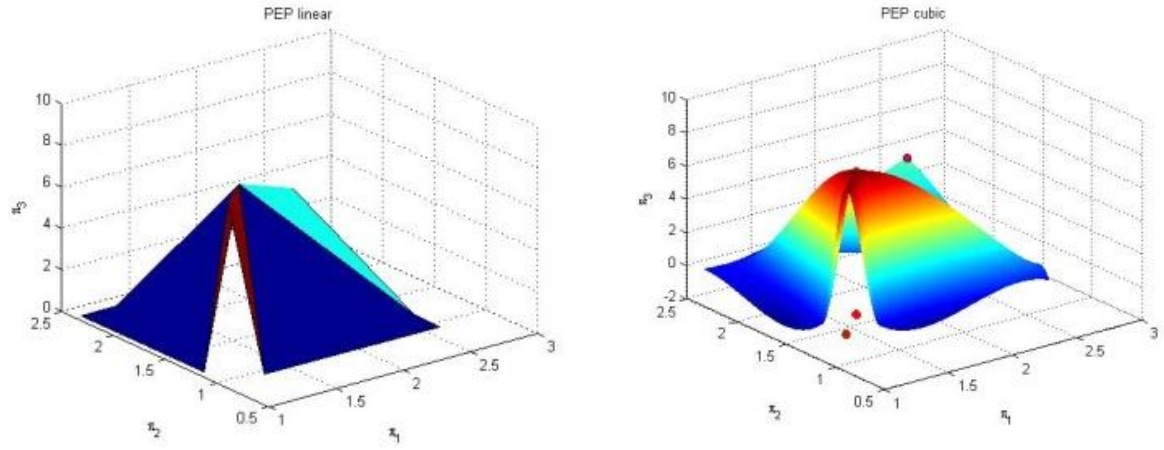
(а) (б)

*Сл. 84.*Зависност запремине кратера од бездимензионих величина π_1 и π_2 за експлозију ТНТ - земља са каменчићима (линеарна интерполација–(а) и кубна интерполација–(б))



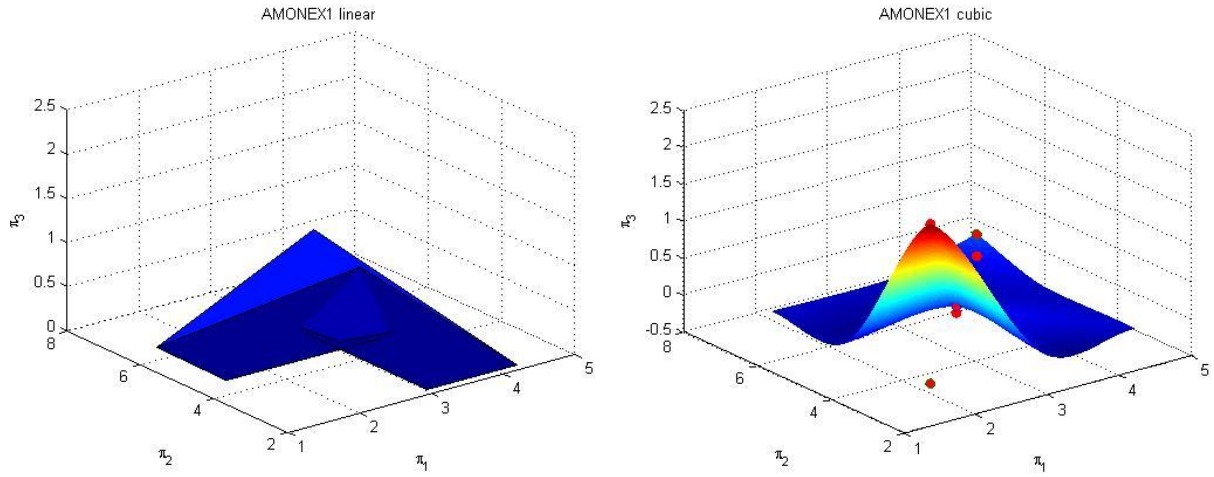
(а) (б)

*Сл. 85.*Зависност запремине кратера од бездимензионих величина π_1 и π_2 за случај експлозије ТНТ на бетону (линеарна интерполација – (а) и кубна интерполација – (б))



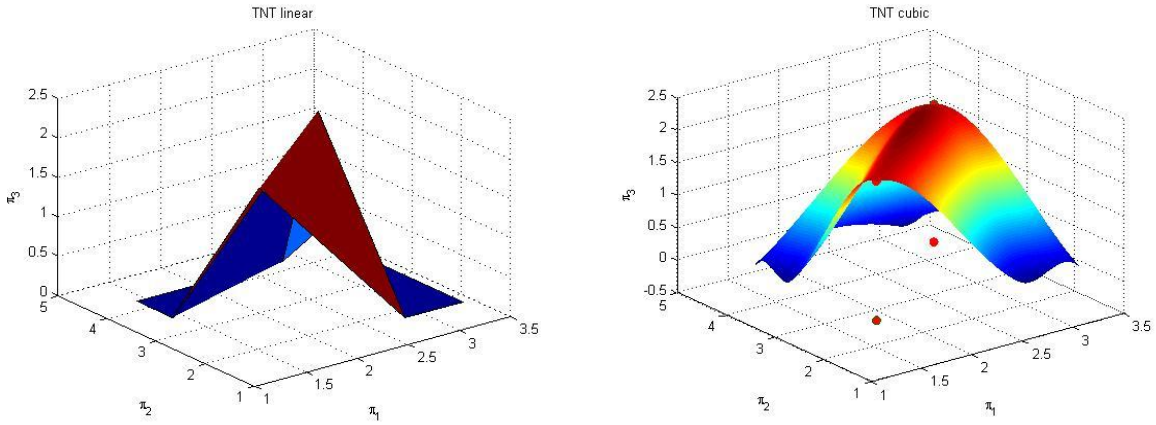
(а) (б)

*Сл. 86.*Зависност запремине кратера од бездимензионих величина π_1 и π_2 за експлозију пентрита на бетону (линеарна интерполација–(а) и кубна интерполација–(б))



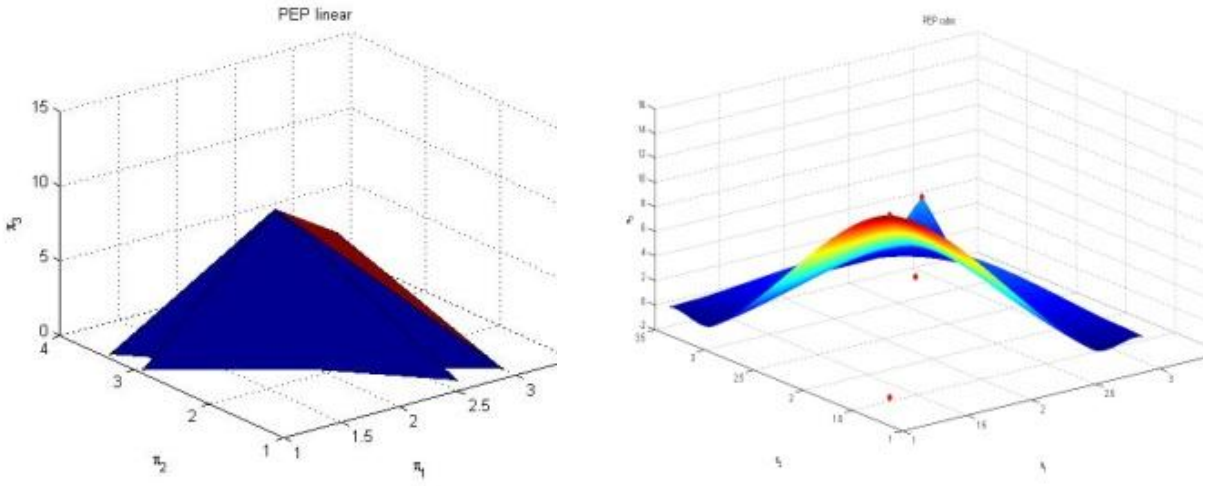
(а) (б)

*Сл. 87.*Зависност запремине кратера од бездимензионих величина π_1 и π_2 за експлозију амонекс1 на бетону (линеарна интерполација–(а) и кубна интерполација–(б))



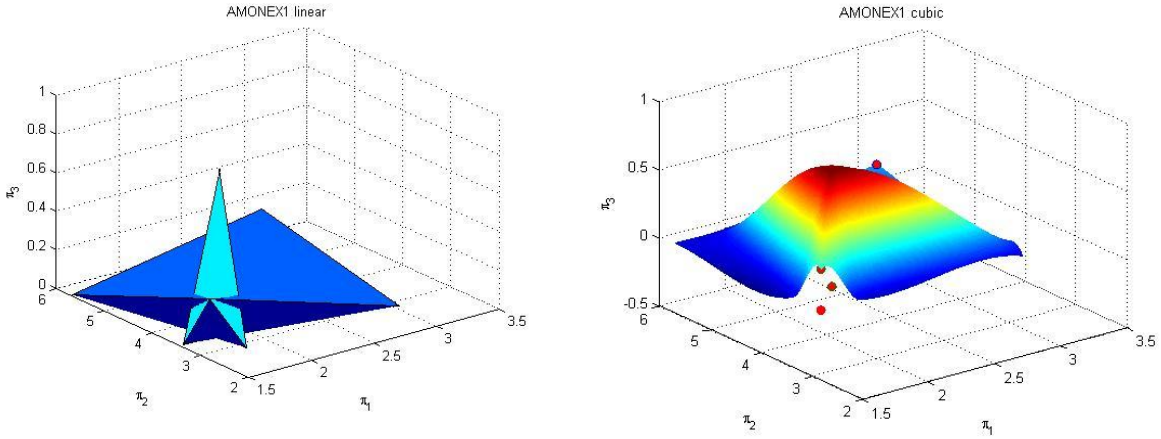
(а) (б)

*Сл. 88.*Зависност запремине кратера од бездимензионих величина π_1 и π_2 за експлозију ТНТ на асфалту (линеарна интерполација – (а) и кубна интерполација – (б))



(а) (б)

*Сл. 89.*Зависност запремине кратера од бездимензионих величина π_1 и π_2 за експлозију пентрита на асфалту (линеарна интерполација – (а) и кубна интерполација – (б))



(а) (б)

Сл.90. Зависност запремине кратера од бездимензионих величина π_1 и π_2 за експлозију амонекс1 на асфалту (линеарна интерполација–(а) и кубна интерполација–(б))

Дијаграми показују да запремина кратера расте са смањењем густине подлоге односно повећањем густине експлозивног пуњења, а као што је на почетку и претпостављено. Већа контактна површина између кратера и подлоге даће већи кратер. Овај модел би био побољшан тј. криве би биле прецизније да је узимано више тачака одн. да је извршено више експерименталних експлозија.

7.5 Нумеричко моделирање стварања кратера површинском експлозијом бризантног експлозива

Неке емпиријске једначине које дају везу између карактеристика пуњења и димензија кратера, могу послужити за прелиминарну процену масе експлозива на основу карактеристика кратера с тим да се мора рачунати на њихова одступања која врло често могу бити неуједначена. Компјутерска анализа оптерећења услед експлозије и оштећења које то оптерећење изазива је алтернатива која представља изазов.

Основа нумеричког моделирања стварања кратера површинском експлозијом бризантног експлозива је у методи коначних елемената која се сврстава у методе дискретне анализе. Теоретске основе методе коначних елемената постављене су средином 20. века, али практична примена је све већа са употребом рачунара. Суштина методе је у физичкој дискретизацији посматраног домена. Уместо елемената диференцијално малих димензија *dx, dy* и *dz*, посматра се део подручја коначних димензија – коначни елемент. Посматрани континум са бесконачним бројем степени слободе апроксимира се дискретним моделом међусобно повезаних коначних елемената са коначним бројем степени слободе. Ти коначни елементи који чине мрежу коначних елемената са коначним бројем тачака-чворова на контурама елемента. Стање променљиве поља у сваком коначном елементу описује се помоћу интерполационих функција које су унапред задате за један тип коначног елемента. Интерполационе функције представљају везу између вредности променљиве поља у било којој тачки коначног елемента и вредности променљиве поља у чворовима. Вредност функције у некој тачки се интерполира између њених вредности у чворовима. Од избора интерполационих функција зависи испуњење континуитета (C_o, C_1, ... , C_m – континуитет функције и извода до *m*-тог реда) између појединих елемената. Елементи са вишим степеном континуитета дају тачнија решења од оних са нижим, али је њихово дефинисање знатно сложеније. У методи коначних елемената углавном се користе полиноми *Lagrange*-а и *Hermite*-а, као и *Serendipitz*-ове функције. Процедура решавања проблема методом коначних елемената састоји се из следећих корака: идентификација проблема, дефинисање елемената, формирање једначина за елемент, повезивање једначина елемената и нумеричко решавање глобалних једначина. Пре

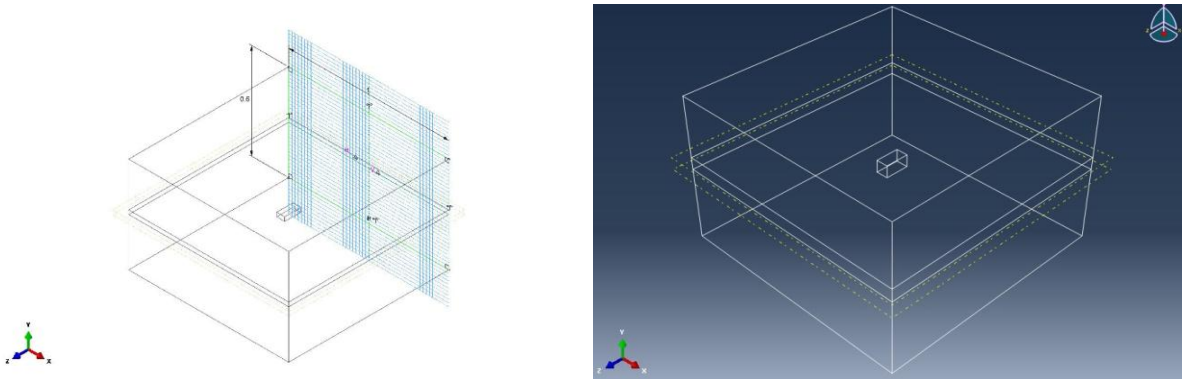
дискретизације проблема мора се донети одлука који се сувишни детаљи могу занемарити, као и која математичка формулација најбоље описује понашање система у проблему површинске експлозије бризантног експлозива. Идеализација проблема у зависности од геометрије, оптерећења и граничних услова се може свести на решавање проблема као осносиметричног, с обзиром да је реч о експлозивним пуњењима који имају једну (цилиндрично пуњење) или три (призматично експлозивно пуњење) осе симетрије. У процесу дискретизације континума бирају се коначни елементи у зависности од облика, линеарности и реда. Фактори који утичу на избор врсте елемената су врста проблема, геометрија, захтевана прецизност, расположивост у оквиру софтвера, природа физичког проблема и знање и искуство корисника. Стварање мреже коначних елемената моделиране структуре се у стручној литератури назива *meshing*. Циљ креирања модела је омогућавање предвиђања понашања континума под дејством оптерећења у овом случају притиска гасовитих продуката експлозије (топлота ослобођена експлозијом се занемарује). Моделирање у конкретној ситуацији започиње идентификацијом геометрије односно дефинисањем чворова, елемената, граничних услова, улазних података о понашању материјала и оптерећења. У случају осносиметричних проблема уштеда у времену прорачунавања постиже се упрошћењем геометрије. Избор одговарајуће врсте елемента и густина мреже утичу на прецизност и ефикасност поступка. У фази нумеричке анализе односно препроцесирања, компјутерски програм аутоматски генерише матрице које описују понашање сваког елемента, комбинује ове матрице у матричне једначине које репрезентују структуру коначних елемената и решава их одређивањем непознатих величина у чворовима. Ови прорачуни могу бити веома дуготрајни. Добијени резултати се анализирају прегледом излазних резултата. Провера овако добијеног математичког модела се проверава кроз експерименте, чиме се врши верификација модела.

За потребе нумеричког моделирања користе се софтвери од којих они савременији користе 3Д метод коначних елемената, метод коначних разлика и др. Најчешће коришћени комерцијални програми за моделирање су ABAQUS, ANSYS – LS DYNA, AUTODYN и др. Нашироко коришћен комерцијални софтвер за анализу оптерећења методом коначних елемената ABAQUS је развијен да омогући симулације деформације и оштећења услед разних врста оптерећења, па и динамичког ударног оптерећења какав је експлозивни талас.

Различите врсте решења доступна су у хидрокодовима за моделирање различитих материјала и услова коришћењем погодних карактеристика за свако решење. Ојлерово решење је конципирано тако да нумеричка мрежа остаје недеформисана док материјал струји од једног до другог елемента. Тако, коначна запремина одређена за сваки елемент и коначне диференцијалне једначине водеће струје су решене унутар елемента. Ојлерово решење може да се користи за моделирање објеката изложених великим деформацијама (нпр. експлозив, који се разлаже на гасовите продукте експлозије, или тло које трпи велике деформације). Лагранжово решење допушта да се мрежа која дефинише објекат деформише. Деформација објекта одређена је деформацијом мреже и у овом решењу нема струјања или преноса материјала од једног до другог елемента. Веома велике деформације и одстрањивање материјала може се решити очувањем мреже и увођењем карактеристике ерозије која дозвољава да се материјал уклони из зоне где се одређени, раније дефинисани критеријуми сусрећу. Лагранжово решење је погодно за моделирање чврстих објеката.

Проблем стварања кратера на површини тла услед експлозије може се анализирати кроз 2Д или 3Д осносиметричну анализу. У случају површинске експлозије на чврстој подлози какво је тло, моделирани су, земља и експлозивно пуњење. Ваздух није моделиран с обзиром да не утиче битно на карактеристике експлозијом створеног кратера. Карактеристике експлозива дате су у поглављу 6.2 у Табели 8. Експлозив се обично моделира Ојлеровим приступом коришћењем материјалног модела за идеалан гас. За једначину стања за продукте разлагања бризантног експлозива узима се JWL једначина стања. (Bjelovuk, et. al., 2015.)

Позната је чињеница да прецизност нумеричких резултата зависи од величине елемената у мрежи, чија је величина ограничена димензијама модела и капацитетом рачунара. У овом случају, модел се направљен тако да је изабрана призма (1,00x1,00x0,60 m) унутар које се налазе експлозивно пуњење, део тла на коме је постављено пуњење и ваздух, приказано на слици 91.



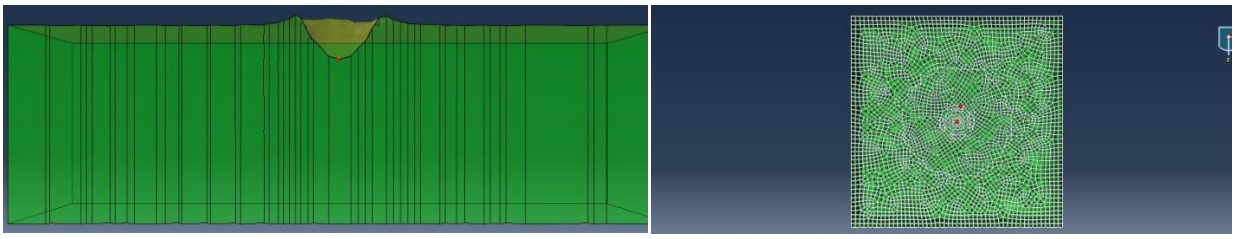
(а) (б)

Сл. 91. Димензије нумеричког модела површинске експлозије ТНТ рађеног у Abaqus – у (а) на земљи, (б) на бетону

Многи параметри, укључујући карактеристике експлозива и тла, утичу на процену масе експлозива на основу карактеристика кратера. У овом раду моделирани су експлозив и тло, док ваздух није моделиран с обзиром да својим карактеристикама битно не утиче на димензије кратера. У представљеним моделима рађеним у *Abaqus* - у варирана је маса експлозивног пуњења у опсегу малих експлозивних пуњења. Нумерички модел је подељен на две различите зоне (опција *Parts* и *Material*) експлозив и тло и моделиран у Ојлеровом простору као 3Д због великих деформација мреже које се јављају услед оптерећења. Гранични услови (*Boundary Conditions*) су бирани тако да се ивице модела не померају. JWL параметри бирани су по угледу на извор (Nagy, et., al., 2009) и износе A=371200000000, B=3231000000, ω=0,3, R1=4,15, R2=0,95, E=4400000. Тачка детонације бирана је с обзиром на величину детонаторске каписле и отвор унутар експлозивног пуњења. Приликом избора оптерећења (опција *Load*) ефекат гравитације није узет у обзир. У мрежи биран је тип коначног елемента EC3D8R *hexahedral*. У свим случајевима нумеричког испитивања изабрана је мрежа са око 100000 чворова.

Резултати нумеричке анализе случајева површинске експлозије ТНТ на земљи приказани су на сликама 92 - 95. Црвене тачке на дијаграмима представљају чворове коришћене за одређивање димензија кратера у опцији *Query - Distance*. Тако је на слици 92. приказан изглед нумерички добијеног кратера (вертикални пресек и поглед

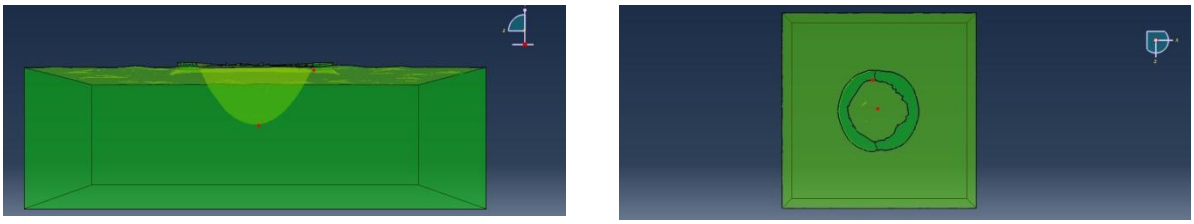
одозго) након површинске експлозије цилиндричног ТНТ пуњења масе 100g вертикално постављеног на земљу (оса пуњења је нормална на раван подлоге).



(а) (б)

Сл. 92. Резултат нумеричке анализе случаја експлозије ТНТ експлозивног пуњења од 100g вертикално постављеног на земљу и формираног кратера у земљи након експлозије (а) вертикални пресек кратера; (б) поглед кратера одозго.

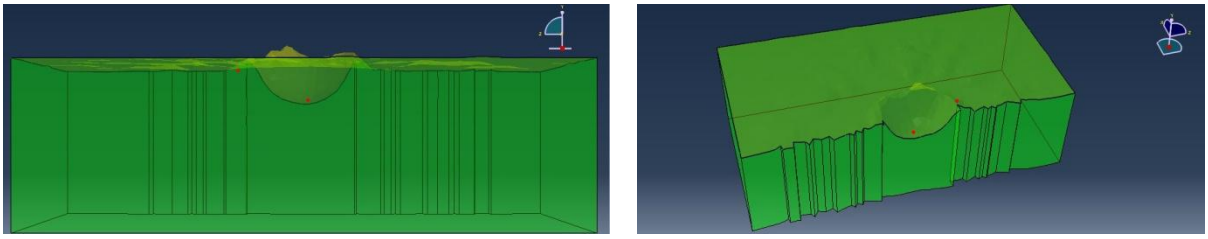
На слици 93. приказан изглед нумерички добијеног кратера (вертикални пресек и поглед одозго) након површинске експлозије призматичног ТНТ пуњења масе 200g хоризонтално постављеног на земљу (оса пуњења је паралелна са равни подлоге), тако да максималном страном додирује подлогу.



(а) (б)

Сл. 93. Резултат нумеричке анализе случаја експлозије ТНТ пуњења од 200g хоризонтално постављеног на земљу тако да максималном страном додирује подлогу и формираног кратера у земљи (а) вертикални пресек кратера; (б) поглед кратера одозго.

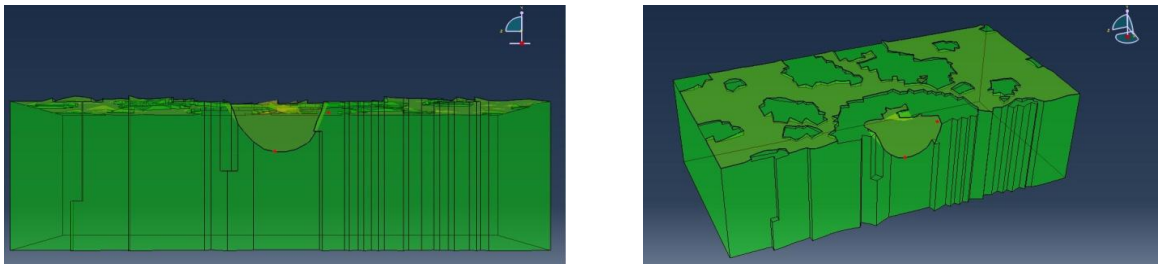
На слици 94. приказан изглед нумерички добијеног кратера (вертикални и аксонометријски пресек) након површинске експлозије призматичног ТНТ пуњења масе 200g вертикално постављеног на земљу (оса пуњења је нормална на раван подлоге).



(а) (б)

Сл. 94. Резултат нумеричке анализе случаја експлозије ТНТ пуњења од 200*g* вертикално постављеног на земљу и формираног кратера у земљи након експлозије (а) вертикални пресек кратера (б) аксонометријски пресек кратера (поглед искоса).

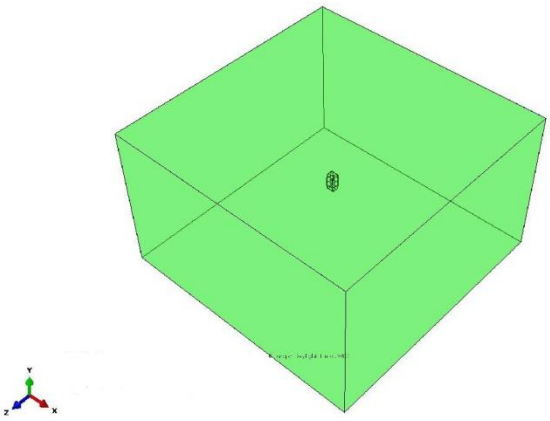
На слици 95. приказан изглед нумерички добијеног кратера (вертикални и аксонометријски пресек) након површинске експлозије призматичног ТНТ пуњења масе 200*g* хоризонтално постављеног на земљу (оса пуњења је паралелна са равни подлоге) тако да мањом страном одирује подлогу.



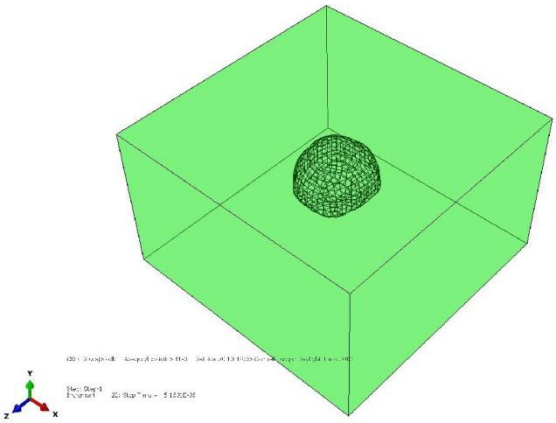
(а) (б)

Сл. 95. Резултат нумеричке анализе случаја експлозије ТНТ експлозивног пуњења од 200*g* хоризонтално постављеног на земљу тако да мањом страном додирује подлогу и формираног кратера у земљи након експлозије (а) вертикални пресек кратера; (б) аксонометријски пресек (поглед искоса).

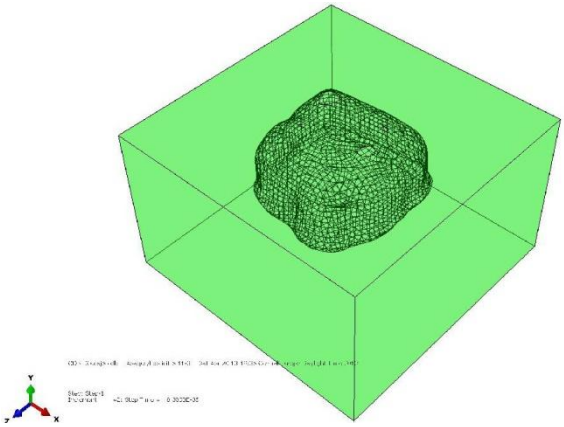
На сл. 96 – 105 приказан је ток процеса стварања кратера у различитим временским тренуцима (на примеру вертикално постављеног ТНТ пуњења од 0,200*[kg]* на земљу).



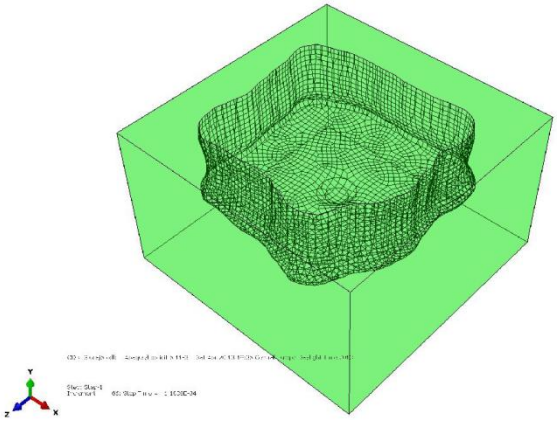
Сл. 96. Почетак процеса разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t = 0,00001s



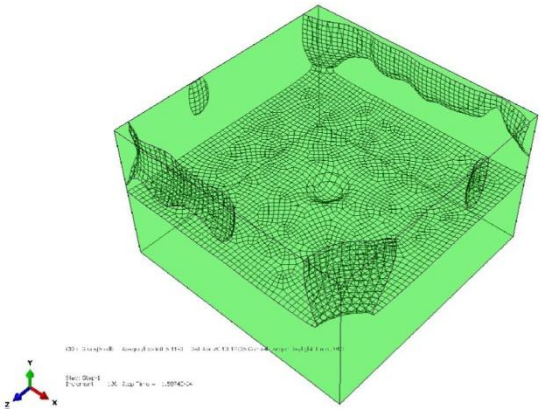
Сл. 97. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t = 0,000052s



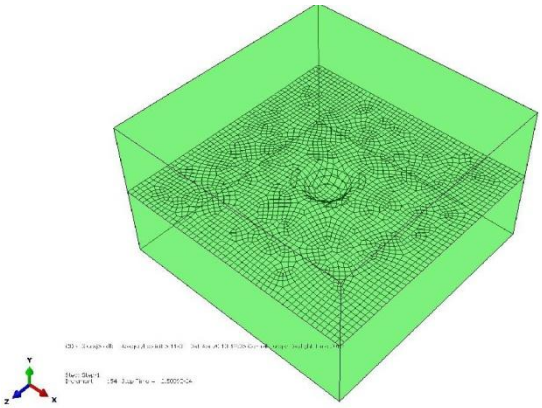
Сл. 98. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t = 0,00008s



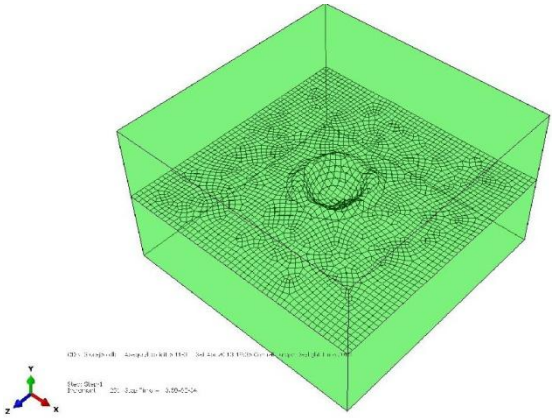
Сл. 99. Процес разлагања експлозивног пуњења и стварање кратера у тренутку t = 0,0001s



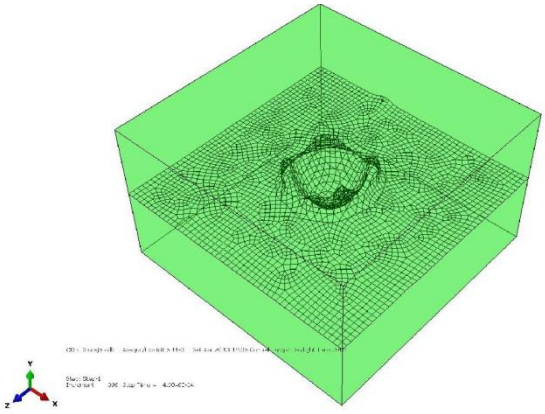
Сл. 100. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t = 0,00019s



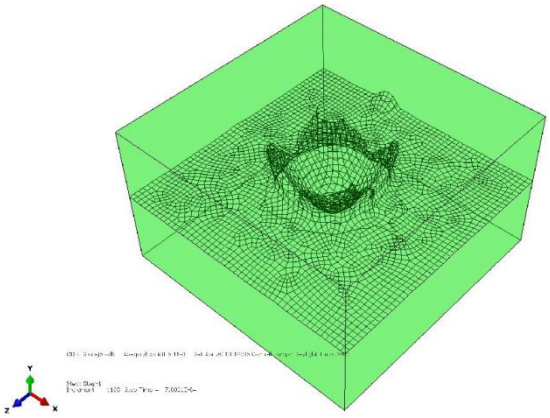
Сл. 101. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t = 0,00029s



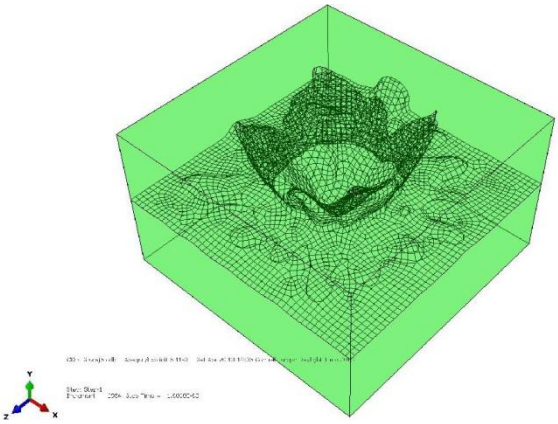
Сл. 102. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t = 0,00036 *s*



Сл. 103. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t = 0,00049 *s*



Сл. 104. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t = 0,0007*s*



Сл. 105. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t = 0,001*s*

На Слици 100. приказан је процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t = 0,00019*s* на којој се види да продукти разлагања експлозивног пуњења напуштају Ојлеров простор. На слици 105. приказан је тренутак када је кратер већ добио сталан облик (t = 0,001*s*) тј. даље ширење продуката детонације неће битно утицати на димензије кратера.

Нумеричка анализа показала је да је трајање експлозивног процеса реда величине *ms* (у случају површинске експлозије пуњења 100*g* ТНТ вертикално постављеног на земљу време формирања кратера је t = 0,0006*s*).

С обзиром на избор координатног система померање чвора по Y координати указује на дубину кратера, док померања по X одн. Z координати указују на величине које се односе на полупречник кратера.

У Табели 104. дати су резултати нумеричке анализе појединих случајева површинске експлозије ТНТ на земљи у виду карактеристика нумерички добијених кратера (радијус, дубина и запремина) са упоредним прегледом експериментално добијених карактеристика кратера. Такође, дат је број коначних елемената коришћен у нумеричкој анализи и релативна одступања нумерички добијених вредности полупречника, дубине и запремине кратера у односу на експерименталне вредности у посматраним случајевима.

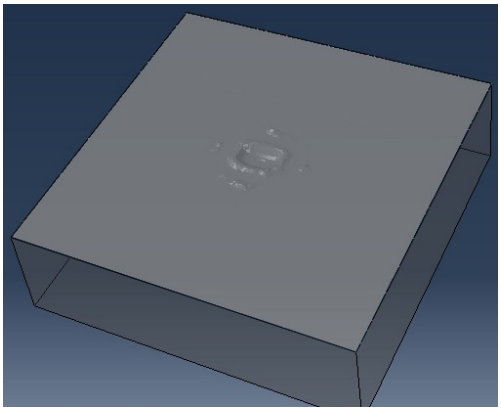
Табела 104. Резултати нумеричке анализе површинских експлозија (број коначних елемената коришћен у нумеричкој анализи, полупречник, дубина и запремина кратера) у поређењу са резултатима реалних експерименталних површинских експлозија

Маса експ. [kg]	***Полупр. експер. кратера [m]***	***Дубина експер. кратера [m]***	***Запрем. експер. кратера [m^3]***	***Полуп. нумер. кратера [m]***	***Дубина нумер. кратера [m]***	***Запрем. нумер. кратера [m^3]***	***Бр. кон. елем.***	***Релат. одст. полупр. кратера***	***Релат. одст. дубине кратера***	***Релат. одст. запрем. кратера***
0,100	0,055	0,07	0,0002216	0,07324	0,07825	0,000439	99534	0,33	0,11	0,9811
0,200	0,08	0,08	0,000535	0,14422	0,06017	0,001311	89940	0,80	0,24	1,4505
0,200	0,165	0,13	0,003538	0,14528	0,14500	0,003205	90630	0,12	0,11	0,0941
0,200	0,15	0,15	0,003532	0,10087	0,08000	0,000852	92876	0,32	0,47	0,7587

Тако, у случају вертикално постављеног експлозивног пуњења ТНТ масе 100g на земљу експериментално добијен реалан кратер је димензија Φ0,11x0,07m, а нумеричка анализа (укупан број коначних елемената 99534) показала је полупречник кратера 0,0732362m и дубину 0,07825m. Запремина нумерички добијеног кратера израчуната је апроксимацијом кратера купом и износи 0,000439m^3. Релативно одступање нумерички добијене вредности полупречника кратера је 33%, дубине кратера 11%, а запремине кратера 98%. У случају вертикално постављеног експлозивног пуњења ТНТ масе 200g

на земљу експериментално добијен реалан кратер је димензија Φ0,16x0,08m, а нумеричка анализа (укупан број коначних елемената 89940) показала је полупречник кратера 0,14422m и дубину 0,0601733m. Релативна одступања нумерички добијене вредности полупречника кратера је 80%, дубине кратера око 24%, а запремине кратера 1,45. Приликом нумеричке анализе експлозије ТНТ пуњења масе 200g постављеног хоризонтално на земљу тако да дужом страном додирује подлогу (укупан број коначних елемената 90630) показала је полупречник кратера 0,145281m и дубину 0,145m, а експериментално је добијен кратер димензија 0,40x0,26x0,13m. Релативно одступање нумеричке вредности полупречника кратера износи 12%, дубине кратера 11%, а запремине кратера 9%. Нумеричка анализа експлозије ТНТ пуњења масе 200g постављеног хоризонтално на земљу (P_k=0,0025) тако да мањом страном додирује подлогу (укупан број коначних елемената 92876) показала је полупречник кратера 0,100875m и дубину 0,08m, а експериментално је добијен кратер димензија 0,30x0,30x0,15m. Релативна одступања вредности полупречника и дубине кратера износе 32% одн. 47%, док запремина кратера одступа око 75%. Када се искључиво посматрају резултати добијене запремине кратера, добијена су врло неуједначена одступања, а најбоље поклапање са експерименталним резултатима (9%) дала је симулација површинске експлозије 0,2kg када пуњење максималном страном додирује подлогу.

За нумеричку анализу проблема површинске експлозије на бетону поступак је сличан изради модела на тлу, с тим што су изабране одговарајуће карактеристике материјала за бетон и то по узору на извор (Nagy, et.al. 2009) У случају нумеричке анализе површинске експлозије ТНТ на бетону јавиће се такође релативно мала одступања у односу на експериментално добијене вредности. Тако у примеру експлозије призматичног ТНТ пуњења масе 200g на бетону одступање је 25% (дубина експериментално добијеног кратера је 0,04m а нумеричком анализом добијен је кратер дубине 0,03m). Резултат анализе површинске експлозије овог призматичног пуњења у *Abaqus* – у дат је на сликама 106 (а) и (б). Процес разлагања експлозивног пуњења трајао је 0,00007s.



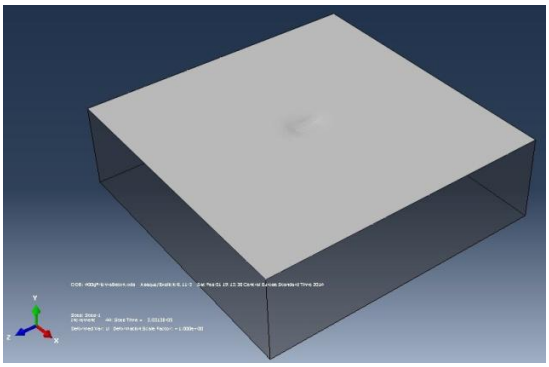
(а)



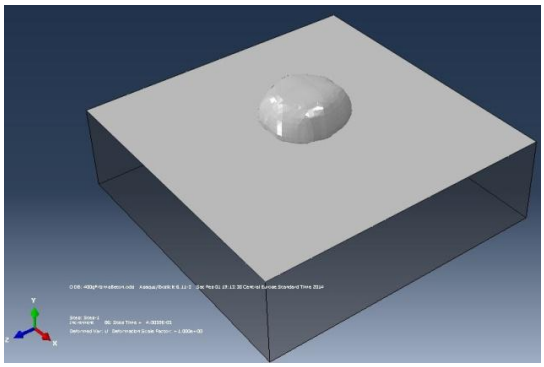
(б)

Сл. 106. Резултат нумеричке анализе површинске експлозије призматичног ТНТ пуњења масе 200*g* на бетону – (а) изглед добијеног кратера (б) вертикални пресек добијеног кратера

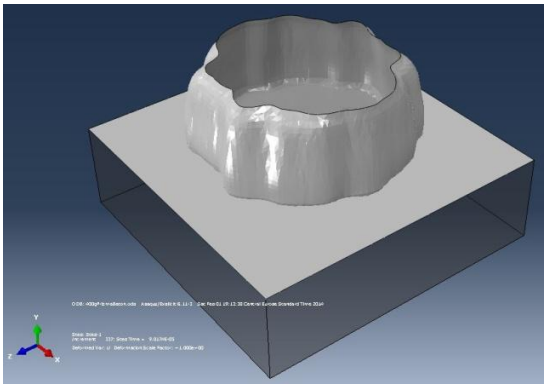
Резултат нумеричке анализе површинске експлозије призматичног пуњења ТНТ од 0,400*kg* на бетону у *Abaqus* – у дат је на сликама 107.- 112. У овом случају добијени резултати показали су одступања од 33% у случају добијене дубине кратера (дубина експерименталног кратера је 0,045*m* а нумеричком анализом добијен је кратер дубине 0,03*m*). Процес разлагања експлозивног пуњења у овом случају трајао је 0,00009*s*.



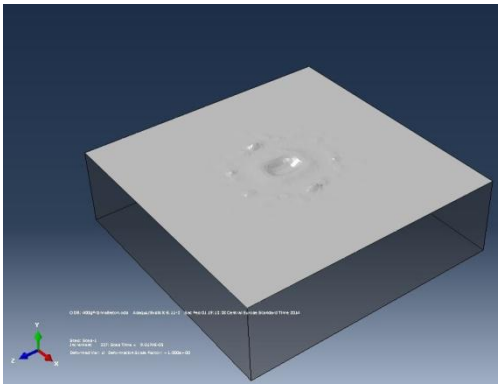
Сл. 107. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t = 0,00003*s*



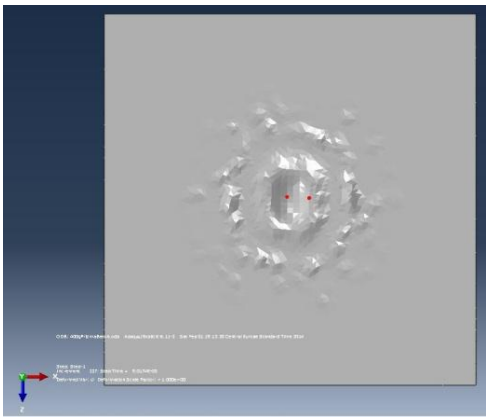
Сл. 108. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t = 0,00004*s*



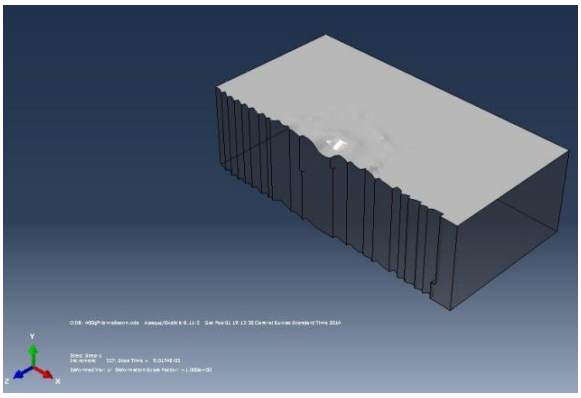
Сл. 109. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t = 0,00009s



Сл. 110. Аксонометријски изглед створеног кратера у бетону у тренутку t = 0,00009s



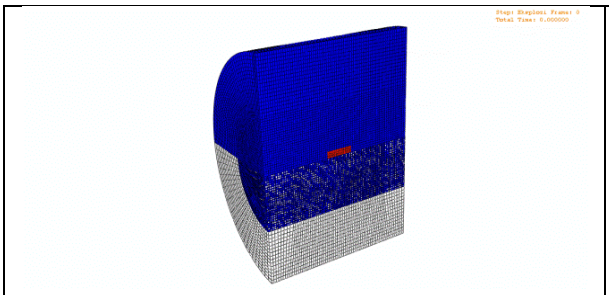
Сл. 111. Изглед створеног кратера у бетону у тренутку t = 0,00009s (поглед одозго)



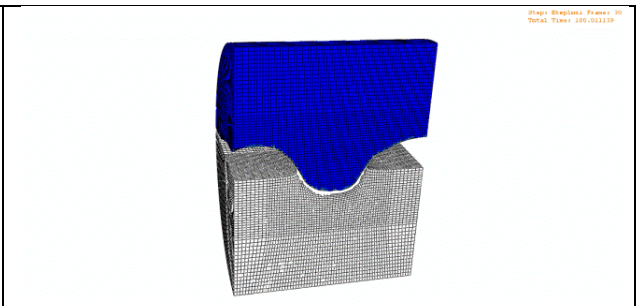
Сл. 112. Уздужни пресека створеног кратера у бетону у тренутку t = 0,00009s

Такође, извршена је симулација процеса стварања кратера површинском експлозијом ТНТ на тлу у програму *Abaqus* али тако да је за технику моделирања изабрана техника спрегнутих Ојлерових и Лагранжових мрежа (*CEL – Coupled Eulerian-Lagrangian technique*). Ради скраћивања процеса трајања симулације проблем је третиран као осносиметрични. Експлозив је моделиран применом Ојлерове мреже, док је тло моделирано коришћењем Лагранжовог приступа. Моделирана је површинска експлозија два положена ТНТ експлозивна пуњења – масе 0,2kg и 2kg. Пуњење ТНТ призматичног облика масе 0,2kg је било постављено тако да максималном страном додирује подлогу, док је цилиндрично пуњење масе 2kg било постављено тако да оса симетрије пуњења буде паралелна са равни подлоге. Као особине експлозива унешене су вредности густине ρ_e=1600 kg/m^3, брзине детонације D=6.93km/s, док су за

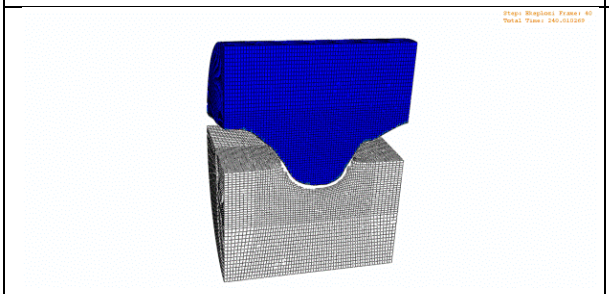
параметре JWL једначине стања продуката детонације узете следеће вредности: A=371.213 Gpa, B=3.2306Gpa, ω=0.3, R_1=4.15, R_2=0.95, E_0=7.0 GPa. Као карактеристике подлоге узете су вредности: ρ_{tla}=*1500 kg/m*^{3}, модул смицања G=0.24GPa, параметри линеарне једначине стања c_0=1.614 *km/s*, s=1.5, Γ_0=0.11, а карактеристике пластичности према односу напона течења [GPa] и пластичне деформације (0.00275 – 0; 0.00483 - 0.02; 0.00515 - 0.04; 0.0062 - 0.08). Изабрана је мрежа од око 60000 коначних елемената типа Ојлер (EC3D8R) за експлозив и око 70000 коначних елемената типа Лагранж (C3D8R) за тло као и опција тачкастог начина иницирања експлозива. Резултат симулације експлозије 0,2*kg* ТНТ показао је трајање процеса 600 μs. Еволуција процеса стварања кратера приказана је на сликама 113 – 120.



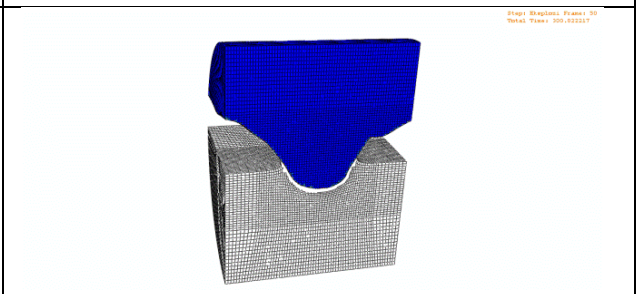
Сл.113. Почетак процеса разлагања експлозивног пуњења у тренутку *t* = 0*s*



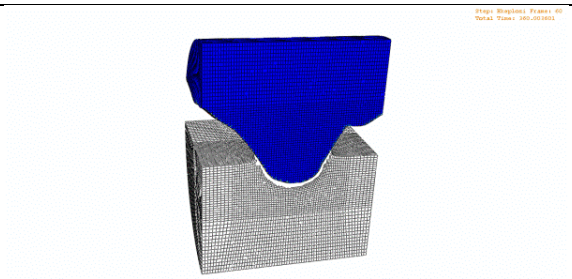
Сл.114. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку *t* =180 μs



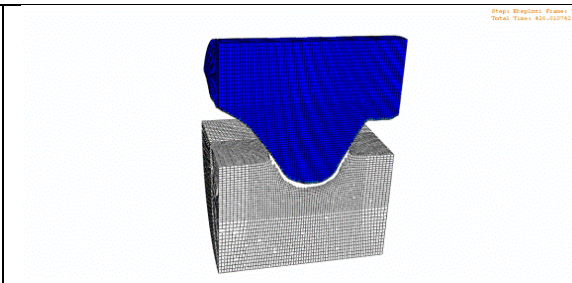
Сл.115. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку *t* =240 μs



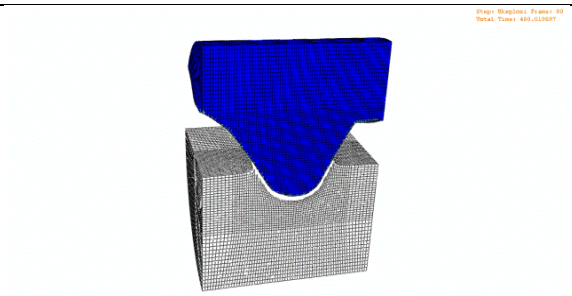
Сл.116. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку *t* =300 μs



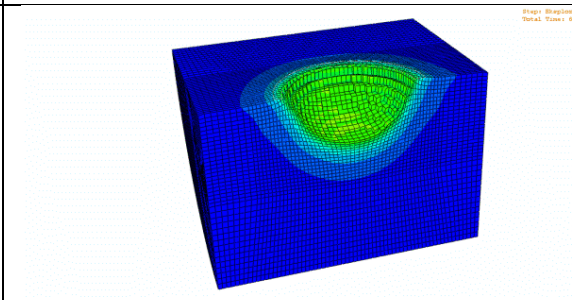
Сл.117. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t =360 μs



Сл.118. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t =420 μs



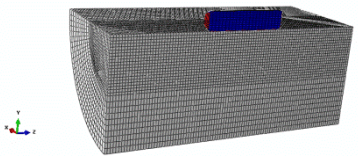
Сл.119. Процес разлагања експлозивног пуњења - стварање кратера у тренутку t =480 μs



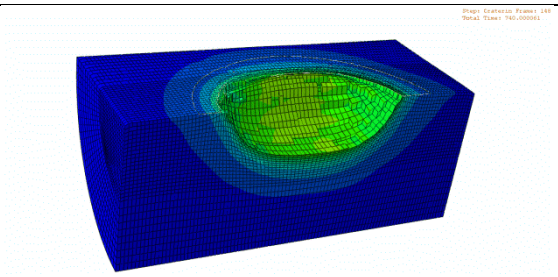
Сл.120. Уздужни пресек створеног кратера у тренутку t =600 μs

Резултати нумеричке анализе површинске експлозије положеног ТНТ пуњења призматичног облика масе 0,2kg тако да максималном страном додирује подлогу дали су следеће карактеристике кратера пречници основе 0,2672m и 0,256m, дубина 0,2225m, а на основу којих је одређена запремина апроксимацијом купом са основом елипсе.

Нумеричка анализа површинске експлозије положеног ТНТ пуњења цилиндричног облика масе 2kg показала је трајање процеса 740 μs. Изглед почетног тренутка процеса и створеног кратера (његов уздужни пресек) приказани су на сликама 121. и 122. Добијене су вредности карактеристика кратера: 0,533m и 0,3541m за пречнике, а 0,1464m за дубину.



Сл.121. Почетак процеса разлагања експлозивног пуњења у тренутку t = 0s



Сл.122. Уздужни пресек створеног кратера након површинске експлозије ТНТ у тренутку t =740 μs

У Табели 105. дати су резултати нумеричке анализе два случаја површинске експлозије ТНТ на земљи (масе од 0,2kg и 2kg) техником *CEL – Coupled Eulerian-Lagrangian* у виду карактеристика нумерички добијених кратера (радијус, дубина и запремина) са упоредним прегледом експериментално добијених карактеристика кратера. Дат је и број коначних елемената коришћен у нумеричкој анализи и релативна одступања нумерички добијених вредности полупречника, дубине и запремине кратера у односу на експерименталне вредности у посматраним случајевима. Релативна одступања вредности полупречника и дубине кратера добијеног нумеричким у односу на полупречник кратера добијен експерименталним путем износи 20% одн. 71% за случај површинске експлозије ТНТ масе 0,2kg, док за пуњење масе 2kg износи 53% одн.18%. Када је у питању релативно одступање запремине кратера, за случај ТНТ масе 0,2kg оно износи 12% док за случај ТНТ масе 2kg износи 82%.

Табела 105. Резултати нумеричке анализе површинских експлозија техником *CEL – Coupled Eulerian-Lagrangian* (број коначних елемената коришћен у нумеричкој анализи, полупречник, дубина и запремина кратера) у поређењу са резултатима реалних експерименталних површинских експлозија

Маса експ. [kg]	***Полупр. експер. кратера [m]***	***Дубина експер. кратера [m]***	***Запрем. експер. кратера [m^3]***	***Полупр. нумер. кратера [m]***	***Дубина нумер. кратера [m]***	***Запрем. нумер. крат [m^3]***	***Бр. кон. елем.***	***Рел. одст. полуп крат***	***Рел. одст. дубине крат***	***Рел. одст. запр. крат***
0,200	0,165	0,13	0,003538	0,1308	0,2225	0,003986	130000	0,2072	0,7115	0,1266
2	0,475	0,18	0,042412	0,2218	0,1464	0,007542	130000	0,5331	0,1867	0,8219

8. ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА И ВЕРИФИКАЦИЈА ПРЕДЛОЖЕНИХ МОДЕЛА

Кроз анализу досадашњих дефиниција појма експлозије, у овом раду дата је дефиниција експлозије са аспекта форензике, а која заправо суштински обухвата претходно дефинисан појам експлозије са проширењем на ефекте експлозије с обзиром на њихов значај у форензици.

Као последица бризантног дејства експлозивног ударног таласа, степен оштећења подлоге у виду кратера представља значајан параметар који се може користити за процену масе употребљеног експлозива, начина постављања експлозивног пуњења и места иницирања.

Према теорији Ливингстон (*Livingston crater theory*) уколико однос између дужине пуњења и пречника/ширине пуњења није већи од шест ($l_e/d_e \leq 6$) механизам формирања кратера при експлозији је сличан као код сферног пуњења. (YE Tu-qiang, 2008) Експерименти су показали да на облик основе кратера велики утицај има и начин постављања експлозивног пуњења одн. вредности контактне површине експлозива и подлоге. Како су за експерименталне експлозије коришћена експлозивна пуњења стандардних патрона и њихове комбинације, то ће након експлозије таквог пуњења кратери имати основу облика круга или елипсе, што се види у табелама у експерименталном делу. Како је у случајевима када су експлозивна пуњења појединачно постављана (када није било увезивања пуњења) однос између дужине пуњења и пречника/ширине пуњења ≤ 6, што значи да је експлозијом створен кратер сличан оном који би се створио код експлозије сферног пуњења (основа кратера је круг). У случајевима када су пуњења надовезивана један за другим и када је однос између дужине пуњења и пречника/ширине пуњења већи од шест ($l_e/d_e>6$) након експлозије појавили су се кратери са издуженијом основом (елипса). Експерименталне експлозије потврдиле су ову теорију.

На основу добијених експерименталних резултата примећено је да након површинске експлозије ових бризантних експлозива у подлози дефинитивно остају оштећења у виду удубљења - кратера. Стога, постојање кратера на месту експлозије је чињеница

која указује на то да је узрок експлозије експлозивно пуњење од бризантног експлозива. Приликом форензичке обраде места експлозије не мора се увек наћи кратер (нпр. у случајевима експлозија пара експлозивних течности и запаљивих гасова), тако да у случајевима када је пронађен кратер свакако треба узорковати трагове ради утврђивања о ком бризантном експлозиву је реч. Значај постојања кратера је, између осталог, и у томе што његове димензије могу послужити за процену масе употребљеног експлозива за изазивање експлозије. Експерименталним експлозијама на различитим подлогама (земља, бетон и асфалт) установљено је да димензије кратера првенствено зависе од врсте и масе употребљеног експлозива за изазивање експлозије. Намеће се логичан закључак да ће експлозивно пуњење веће масе створити већи кратер. Поређењем вредности запремина кратера створених површинском експлозијом исте масе а различите врсте експлозива примећена је разлика у вредностима запремине кратера тј. експлозив са већом вредношћу брзине детонације ствара већи кратер. Анализа добијених експерименталних резултата указује да највећи интензитет оштећења подлоге за исту масу даје пластични пентритски експлозив, а затим ТНТ и привредни експлозив Амонекс-1.

На димензије кратера утичу и врста и карактеристике подлоге. У експериментима су коришћена три типа подлоге (земља, бетон и асфалт) због њихове највеће заступљености у околини. Бетон и асфалт су хомогеније подлоге у односу на земљу чије физичке и хемијске карактеристике варирају од подручја до подручја.

Упоредна анализа димензија и запремина експериментално и нумерички добијених кратера на подлогама од земље, бетона и асфалта показала је да се кратери највећих димензија стварају на подлози од чисте земље, нарочито ако је она растресита (с обзиром на најмању вредност густине), а затим на бетонској подлози и, на крају, на асфалтној подлози, уколико посматрамо исту масу експлозива.

Анализом добијених резултата дошло се и до закључка да на облик и димензије кратера утиче и начин постављања експлозива, тј. велики утицај има и контактна површина експлозивног пуњења и подлоге. Уколико је у површинској експлозији коришћено исто пуњење (иста врста експлозива и иста маса) и постављено на више начина (различите вредности контактне површине) уочава се да ће основа кратера бити другачија и да ће запремина кратера имати другачију вредност.

Експерименти су показали да на облик и димензије кратера утиче и место иницирања експлозива. Код хоризонтално постављеног пуњења уколико је пуњење иницирано на једној страни, на тој ће се страни створити нешто дубљи кратер у односу на супротну страну. Ово запажање је нарочито значајно код криминалистичко-техничке/форензичке обраде места експлозије јер се у том делу кратера (дубљем делу) могу пронаћи остаци средства за иницирање и изнети закључак о начину иницирања експлозивног средства. Уколико је пуњење иницирано «одозго» онда ће правац простирања експлозивног таласа бити нормалан на раван подлоге, те се уочава нешто већи кратер у односу када је иницирање било са стране (пуњење исте масе и иста контактна површина).

Теоријска разматрања и експериментална испитивања су показала да је степен оштећења подлоге – облик, димензије и запремина кратера, у функционалној зависности од масе, врсте и начина постављања експлозивног пуњења, врсте и квалитета подлоге, што је приказано преко модела рађеног на бази димензионе анализе, као и нумеричком анализом.

Добијени експериментални резултати указују на зависност насталог ефекта експлозије (кратера) и полазних величина (врста експлозива, маса, начин постављања и начин иницирања експлозивног пуњења и материјала подлоге), тако да се они могу користити за прелиминарну процену масе експлозива који је изазвао експлозију једноставним поређењем карактеристика кратера из експеримената и кратером реалне експлозије поводом којих се изашло на увиђај. Уколико за исту вредност масе експлозивног пуњења расте вредност контактне површине расту вредности запремине кратера. Такође, могу се користити и одговарајуће емпиријске формуле које су дале мала одступања у односу на реалне експерименталне експлозије и предложене нове емпиријске формуле.

За површинске експлозије амонекса1, ТНТ и пентрита експерименти су показали директну зависност масе експлозива и запремине кратера и то у облику степене функције која је стално растућа и са вредностима у првом квадранту (мања вредност масе експлозива даће мању вредност запремине кратера и обрнуто). Такође, експериментални резултати показали су варирање вредности карактеристика кратера (пречника, дубине и запремине) са променом вредности контактне површине између експлозива и подлоге, а за исту вредност масе експлозива, односно да се за једну вредност контактне површине а различите вредности масе експлозива добијају

различите вредности запремине кратера. Тако је у случајевима постављања једне вредности масе експлозива а различите контактне површине примећено да су у случају мање вредности контактне површине мања запремина и мањи пречник кратера.

Овим радом разматрана је могућност коришћења емпиријских једначина пронађених у стручној литератури за релативно мале кратере, одн. мале масе експлозива (до 10kg). Неке од емпиријских једначина дају везу између масе експлозива и запремине кратера (*Olsen (1), Noon (5)),* неке дају везу између масе експлозива и пречника кратера (*Girard* (3) и *Yallop* (6), *Noon* (4), *Szuladzinsky* (13), *Ambrosini* (17)) неке између масе експлозива и полупречника кратера (Власов (8), Покровски (9), *Kinney* (10), *Merrifield* (12)),неке између масе експлозива, полупречника кратера и дубине (Боресков (7), Јарамаз (14), *Cook* (11)). Експерименти су показали да пуњења различитих маса могу дати исти пречник односно полупречник кратера уколико су постављени на различите начине (различита вредност контактне површине) што би могло навести на закључак да пречник одн.полупречник кратера уколико сам фигурише у емпиријској једначини неће дати увек валидне резултате. Све емпиријске једначине су дате у виду растућих функција зависности масе експлозива од димензија/запремине кратера, сем (13). За површинску експлозију ТНТ на земљи једначине Покровски (9) и *Kinney* (10) су идентичне када се усагласе према јединицама СИ система. Једначине (1), (3), (4), (5), (6) и (10) карактеристике експлозива узимају преко корекционог фактора у односу на ТНТ; (7), (8), (11), (12) и (13) карактеристике тла узимају преко коефицијента k, k_1,k_2,k_3,k_4,k_5,k_6,k_7 док карактеристике експлозива узимају преко корекционог фактора у односу на ТНТ; (9) узима у обзир карактеристике експлозива преко ρ_e.

Појединачне вредности одступања прорачунатих маса експлозива од вредности коришћених у експерименталним експлозијама дате су у табелама у поглављу 7.1, а где се може видети да су одступања врло неуједначена. Тако, једначина *Olsena* (1) генерално није дала велика одступања у експериментима површинских експлозија са малим масама експлозива (до 10kg). У случају површинске експлозије амонекса1 на земљи најмање одступање дала је код вредности пречника кратера око 0,35m (ред величине око 10%) а када је било постављено 0,2kg амонекса1. У случају експлозије ТНТ на земљи најбоље резултате показала је код вредности пречника кратера око 0,3m а када је било постављено 0,2kg ТНТ, док је у случају експлозије пентрита на земљи најмање одступање дала када је пречник кратера био 0,5m (0,6%) када је било постављено 0,25kg пентрита, а највеће одступање било је код кратера пречника 0,4

(скоро 60%) када је било усправно постављено 0,25kg. Код експлозије ТНТ на земљи са каменчићима најбоље резултате показала је код кратера пречника 0,335m (9%) а највеће одступање било је код кратера пречника 0,35 (236%). При експлозији пентрита на земљи са каменчићима јавила су се одступања од 2% и 39%. Код експлозије на бетону и асфалту дала је врло неуједначена одступања. У случају површинске експлозије амонекса1 на бетону одступања крећу у опсегу од (75-96)%, ТНТ (82-89)%, а пентрита (44-79)%. Ова једначина карактеристике експлозива узима преко корекционог фактора у односу на ТНТ.

Једначина коју су навели *Girard* (3) и *Yallop* (6) дала је веома велика одступања у посматраном опсегу маса експлозива односно димензија кратера у свим случајевима. Запажа се да се сва одступања крећу (95-99)%.

Једначина (4), а коју је навео *Noon,* најбоље резултате показала је у случају површинске експлозије 0,54kg ТНТ на земљи када је пречник кратера био 0,55m (дала је одступање 39%); када је било постављено 0,25 kg пентрита и појавио се пречник кратера 0,5m (2%), а при експлозији 0,5kg амонекса1 код вредности пречника кратера око 0,525m (22%). У случају експлозије ТНТ на земљи са каменчићима одступања су била врло неуједначена, а најближе експериментално постављеној маси експлозива добила се вредност код кратера пречника 0,35m (16%). Такође, ова једначина дала је велика одступања (преко 83%) у случајевима експлозија амонекса, ТНТ и пентрита на бетону и асфалту.

Једначина (5) коју је навео *Noon* дала је врло велика и неуједначена одступања. У случају површинске експлозије 1kg амонекса1 на земљи најбоље резултате показала је када је дала одступање 81% (кратер је био пречника 0,525 m). При експлозији 0,2kg ТНТ на земљи када је кратер био пречника 0,33m најмање одступање је било 91%, док при експлозији пентрита примећена је нелогичност да је код коришћене веће масе експлозива (0,25 kg>0,2 kg) прорачуном добијена мања вредност масе услед неузимања у обзир карактеристике кратера – дубина или запремина. Слично је и код подлоге земља са каменчићима, бетон и асфалт. Једначина је дата у виду линеарне зависности између масе експлозива и запремине кратера, те се одступања повећавају са растом запремине кратера одн.масе експлозива.

Једначина Борескова (7) у случају површинске експлозије амонекса1 на земљи најбоље резултате (одступање 6%) дала је у случају димензија кратера од 0,35m, а када је било

постављено 0,2kg, а највеће 93% (пречник кратера 1,65 m), док је у случају ТНТ најмање одступање (11%) дала код пречника кратера од 0,55m (постављено 0,54 kg), а највеће (90%) у случају пречника кратера 0,11m одн. масе експлозива 0,1kg. При експлозији пентрита најбоља поклапања (одступање 2%) дала је код пречника кратера од 0,35m одн. масе експлозива 0,1kg, док је највећа одступања (46%) дала кад је пречник кратера био 0,4 m одн. маса експлозива 0,2kg. У случају експлозије на земљи са каменчићима одступања су варирала у опсезима (11-70)% за ТНТ, (6-24)% за пентрит. При експозијама на бетону одступања су варирала (19-80)% за амонекс1, (37-93)% за ТНТ и (23-30)% за пентрит, док су при експлозијама на асфалту одступања износила (71-309)% за амонекс1, (41-77)% за ТНТ и (12-44)% за пентрит.

Једначина Власова (8) у случају површинске експлозије на земљи има одступања од 14% (за пречник кратера 0,7m одн.1,5kg) до 187% (за пречник кратера 0,14m одн.0,09kg) за амонекс1, од 9% (за пречник кратера 0,425m одн.2kg) до 625% (за пречник кратера 0,55m одн.0,54kg) за ТНТ и за пентрит (256-736)%. Може се закључити да ова једначина даје врло неуједначена и у појединим случајевима врло велика одступања нарочито у случају експлозије на земљи са каменчићима. При експлозији на бетону одступања се крећу у следећим опсезима: (54-88)% за амонекс1, (73-78)% за ТНТ и (48-52)% за пентрит, а у случају експлозија на асфалту одступања су веома велика.

Једначина Покровског (9) за случај експлозије амонекса на земљи има одступања у границама од 13% (за пречник кратера 0,95m) до 91% (за пречник кратера 0,14m); ТНТ од 17%(за пречник кратера 0,42m) до 96% (за пречник кратера 0,27m); пентрит (6-120)%. При експлозији ТНТ и пентрита на земљи са каменчићима одступања варирају (6-71)% одн. (78-117)%. Код експлозије амонекса на бетону одступања су велика и варирају (87-96)%, ТНТ (72-87)% а пентрита (67-69)%. У случајевима експлозије на асфалту одступања су (92-95)% за амонекс, (75-90)% за ТНТ и (24-62)% за пентрит.

Једначина *Kinney* (10) дала је врло неуједначена одступања (1-215)% при експлозији амонекса на земљи, (4-96)% при експлозији ТНТ и (2-39)% при експлозији пентрита. Код експлозије на земљи са каменчићима одступања су у опсегу (6-71)% за ТНТ а (15-40)% за пентрит. При експлозији на бетону одступања су велика али уједначена и то (70-92)% за амонекс, (72-86)% за ТНТ и (67-69)% за пентрит, док су за експлозију на

асфалту одступања у границама (82-88)% за амонекс, (75-90)% за ТНТ и (51-75)% за пентрит.

Једначина *Cook* (11) даје одступања (4-78) % за амонекс, (3-97)% за ТНТ и (0,6-48)% за пентрит при екплозији на земљи док код експлозије на земљи са каменчићима одступања варирају (2-100)% за ТНТ одн. (53-110)% за пентрит. При експлозији на бетону (13-50)% за ТНТ, (21-72)% за амонекс и (3-19)% за пентрит, а код кратера на асфалту одступања се крећу у границама (33-72)%. И ова једначина даје неуједначена одступања с тим да поједине вредности дају скоро тачне вредности масе при прорачуну.

Једначина *Merrifield* (12) за експлозију на земљи даје следеће опсеге одступања: (60-98)% за амонекс1, (25-99)% за ТНТ и (87-99)% за пентрит. Код експлозије на земљи са каменчићима одступања су била 85% и 97% за ТНТ и 87% и 89% за пентрит. Код кратера на бетону одступања су веома велика (99%) у свим случајевима, а при експлозијама на асфалту (32-55)% за амонекс, (6-62)% за ТНТ и (6-89)% за пентрит.

Једначина *Szuladzinsky* (13) даје веома велика и неприхватљива одступања у свим случајевима површинских експлозија масе до 10 *kg*. Приликом анализе функције промене масе експлозива са пречником кратера ($M_e=k_5d+k_6d+k_7$) дошло се до следећег закључка: са повећањем пречника кратера до вредности која одговара темену функције (где је минимум функције по којој се мења прорачуната маса са пречником кратера, одн. тачка у којој је први извод функције једнак нули) вредност прорачунате масе се смањује с обзиром да је у питању зависност у облику конвексне квадратне функције[39]. Стога се може закључити да ова формула не може да се примени за мале масе експлозива.

Једначина коју је навео Јарамаз (14) дала је врло неуједначена одступања: за површинску експлозију амонекса1 на земљи одступања у односу на експерименталне вредности су велика и крећу се (95-99)%, за ТНТ (9-99)% и (48-98)% за пентрит. Такође, велика одступања су и у случајевима експлозија на земљи са каменчићима и на бетону и асфалту – скоро 100%.

[39] При експлозији ТНТ на земљи тачка која одговара темену функције је Т(4,5891; 85,30947) што би значило да маса експлозива опада са пречником кратера све до вредности пречника кратера од 4,5891*m*.

Једначина *Ambrosini* (17) такође је дала врло неуједначена одступања и то: (15-98)% за амонекс1 на земљи, (64-99)% за ТНТ на земљи и (63-93)% за пентрит на земљи. Вредности одступања у 68% и 96% односе се на експлозију ТНТ на земљи са каменчићима. При експлозији пентрита на земљи са каменчићима добијена су одступања 57% и 69%. Када су у питању случајеви експлозија на бетону и асфалту одступања су до скоро 100%.

Код једначина код којих фигурише само пречник/полупречник кратера (3),(4),(6),(10), (12), (13),(17) примећене су исте вредности прорачунате масе експлозивног пуњења у случајевима када су биле постављане различите вредности маса експлозива. У једначини (9) поред полупречника кратера фигурише и густина експлозива што би искључило употребу ТНТ еквивалента у случају експлозије других бризантних експлозива. Такође, примећено је да уколико би се прорачун радио са густином ТНТ и ТНТ еквивалентом не би се дошло до истих резултата. У случају експлозије ТНТ једначине (9) и (10) дају исте резултате.

Од посматраних емпиријских једначина за процену масе експлозива на основу димензија кратера након површинске експлозије амонекса1, ТНТ и пентрита на земљи примећено је да убедљиво највећа одступања дала једначина (13), а коју је дао *Szuladzinsky.* Она изражава квадратну зависност између масе експлозива и пречника кратера као једне његове карактеристике, дала је велика одступања при провери кроз експерименталне податке.Такође, једначина коју је навео *Noon* – (5), а која приказује линеарну зависност масе експлозива и запремине кратера, дала је велика одступања. Компјутерски програм који је понудио *Holsapple*, а који је доступан *online* начелно може да се користи у прелиминарној процени масе коришћеног експлозивног пуњења када су у питању веће вредности димензија кратера. Приликом овог истраживања и анализе могућности примене овог програма у прелиминарној процени коришћене масе експлозива на основу димензија кратера примећена су већа одступања вредности запремина кратера у случају коришћења малих маса експлозива. Такође, примећено је да у програму не постоји могућност избора другачије подлоге од земље, нпр. бетона или асфалта, као ни могућност варирања вредности густине подлоге. Такође, уочено је да не постоји могућност избора контактне површине ни места иницирања, а експерименти показују да су то фактори који утичу на димензије односно величину запремине кратера. Примећено је и да програм не даје могућност избора пуњења облика призме и других облика као ни начин постављања експлозивног пуњења, тј.

према програму за једну вредност масе експлозива добија се само једна вредност запремине кратера. Како програм даје могућности израчунавања димензија и запремине кратера површинских експлозија, то су експериментални подаци са терена упоређивани са добијеним вредностима. Вредности експерименталних запремина кратера и оних добијених применом овог програма у случајевима површинских експлозија амонекса1, ТНТ и пентрита на земљи, земљи са каменчићима, бетону и асфалту приказане су у табелама 41-47 и начелно се може рећи да одступања варирају у великом опсегу али има случајева када су одступања прихватљива. Приликом коришћења овог програма се, може приметити напомена да за мале масе експлозива резултати нису валидни, што је експериментима и потврђено. При упоређивању експериментално добијених заптемина кратера са оним добијеним овим програмом примећена су врло неуједначена одступања. Најуравнотеженија одступања овај програм дао је у случају експлозије пентрита на земљи (11-94)%.

У поређењу са представљеним емпиријским једначинама (1), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14) и (17) предложене емпиријске формуле дале су уједначена и прихватљивија одступања. Тако је једначина (63) дала најмање одступање (2%) у случају постављања 0,2*kg* амонекса1 на земљи. Ова једначина показала је боља поклапања са експериманталним подацима него једначина (64) која важи за ТНТ уз обавезу коришћења ТНТ корекционог фактора а код које је најмање одступање било 15%. Кад је у питању површинска експлозија ТНТ на земљи, једначина (64) најмање одступање (8%) дала је у случају постављања 0,54*kg.* При експлозији 0,1*kg* пентрита на земљи j-на (65) дала је најмање одступање (2%) а при примени једначине(64) за ТНТ са корекционим фактором у случају постављања 0,25*kg* пентрита било је најмање одступање (15%) док је у случају експлозије ТНТ на земљи са каменчићима најмање одступање дала једначина (66) код употребе 0,2 *kg* експлозива. Код експлозија на бетону и асфалту све предложене једначине дале су резултате са прихватљивим одступањима.

У случају предложених једначина које укључују и унапред познату контактну површину најпрецизније резултате (одступање 5%) дала је једначина (80) за експлозију

0,2 kg амонекса на земљи док је једначина (78) за експлозију 1kg ТНТ на земљи дала одступање (5%).

Генерално, једначине које су дате посебно за случај површинске експлозије одређене врсте експлозива на одређеној подлози дале су боље резултате него једначине које су дате за ТНТ с тим да се користи корекциони фактор.

Користећи метод димензионе анализе развијени су модели карактеристика кратера који одређују зависност запремине кратера од карактеристика подлоге. Димензиона анализа није без мана. Она се обично користи у ситуацијама када је немогуће извести неке експерименте (нпр. у случајевима великих експлозија), али као што се у овом раду види она је ипак послужила за израду модела карактеризације кратера и у случајевима малих пуњења. Математички модели израђени на бази димензионе анализе могу да се користе за предвиђање карактеристика кратера на основу карактеристика експлозива и тла а који је настао након површинске експлозије, али и за процену масе коришћеног експлозива на основу карактеристика кратера. Модел показује да ће кратер бити већи у случају експлозије на подлози мање густине што је експериментима и потврђено.

Емпиријски модели направљени у овом истраживању израђени су на бази експерименталних података тако да је приликом апроксимације криве која би имала најбоље поклапање са експерименталним подацима испоштован критеријум најмањих квадрата.

Графички прикази емпиријског модела урађеног помоћу сплин интерполације у MATLAB – у показали су да је запремина кратера изражена преко бездимензионе величине π_3 директно сразмерна са густином експлозива, а обрнуто сразмерна са густином тла у свим посматраним случајевима, што је и логично.

На почетку овог истраживања постављене су неке хипотезе међу којима и она да приликом површинске експлозије бризантног експлозива на површини тла са којом је у

експлозивно пуњење у контакту долази до избацивања дела подлоге и ствара се кратер одређене запремине као карактеристичан траг, а која је кроз модел на бази експерименталних испитивања потврђена. Карактеристике (димензије и запремина) кратера зависе од врсте и масе коришћеног експлозива, али и густине као карактеристике тла, што се показало као потврђено кроз моделе урађене на основу димензионе анализе. Претпостављена је директна сразмера димензија оштећења подлоге у виду кратера (а које је изражено запремином кратера) и масе коришћеног експлозива, очигледно је да је развијени модел потврдио хипотезу. Такође, претпостављена је обрнута сразмера карактеристика кратера (димензије и запремина) и карактеристика подлоге. На величину запремине кратера утиче и вредност контактне површине што је и потврђено кроз предложену зависност.

Постављене хипотезе су потврђене и кроз експерименте и моделе.

Грешке које се јављају у процесу моделирања у овом случају односиле би се на грешке мерења димензија кратера. То је грешка која се јавља услед непрецизности приликом прикупљања података. Она може бити услед људског фактора или услед непрецизности мерних инструмената. С обзиром да је у случају конвенционалног мерења димензија кратера коришћена мерна трака са најмањом вредношћу подеока 1 *mm*, то је толика и грешка мерења с тим да треба напоменути да су димензије кратера приликом мерења заокруживане на 5*mm*. Примећено је да на истим подлогама исте масе експлозива могу створити кратере различитих димензија, што се објашњава нехомогеношћу подлоге која се јавља у реалним условима. Вредности тих одступања дате су у Прилогу 3. Одступања која се јављају резултат су одступања у густини подлоге с обзиром да је реч о природној подлози која често није реално хомогена. Тако у случају површинске експлозије на земљаној подлози услед активирања амонекса1 вредности запремине кратера варирају до 30%, услед активирања ТНТ до 25% док услед активирања пентрита варирају до 25% гледано кроз вредности релативних одступања. У случају експлозије ТНТ на земљи са каменчићима одступања се крећу и до 30%, а у случају експлозије ТНТ на бетону до 15%.

На ова одступања треба рачунати приликом форензичке процене масе експлозива.

Нумерички модел рађен у *Abaqus* - у дао је неуједначена одступања у односу на експерименталне резултате када се посматрају вредности запремине кратера, мада је у појединим случајевима дао задовољавајућа поклапања у односу на експерименталне резултате и потврдио претпоставке с обзиром да је у моделу занемарен утицај земљине теже, као и да контактна површина утиче на вредности карактеристика кратера. Приликом упоређивања резултата добијених нумеричком анализом и експерименталним површинским експлозијама у појединим случајевима јављају се прихватљива одступања. Најбољи резултат нумеричке анализе - поклапање у погледу вредности запремине кратера са експерименталним резултатима од 9% добијен је у случају симулације површинске експлозије 0,2*kg* ТНТ када пуњење максималном страном додирује подлогу. Добар резултат добијен је и у случају хоризонтално постављеног ТНТ пуњења од 200*g* на земљу, а када су апсолутна одступања била реда величине неколико *mm* одн. када су релативна одступања полупречника кратера износила 12%, а дубине кратера 11%. Нумеричка анализа површинске експлозије ТНТ на бетону такође је дала прихватљива одступања дубине кратера (25%).

Поређењем резултата двеју симулација површинске експлозије на тлу ТНТ пуњења од 200*g* (мрежа коначних елемената се састоји искључиво од Ојлерових елемената и када се мрежа коначних елемената састоји од Ојлерових и Лагранжових елемената) исказаних кроз релативно одступање запремине кратера у односу на експериментално добијену вредност, бољи резултат је постигнут избором искључиво Ојлерових елемената (9%) мада је и *CEL – Coupled Eulerian-Lagrangian* приступ дао прихватљива одступања (12,66%). Овај закључак се потврђује и при посматрању полупречника и дубине кратера када релативно одступање нумерички добијене вредности полупречника кратера од експерименталне износи 20% у случају коришћења технике CEL, док при избору Ојлерових елемената ово одступање износи 12%, одн. 71% и 11% у случају дубине кратера.

Избором ситније мреже коначних елемената добили би се прецизнији резултати кратера, што би захтевало рачунар бољих перформанси.

На сликама 1-7 у поглављу 2 као и у Прилогу 1 (на сликама 1-49) дати су подаци о броју експлозија на територији Републике Србије (без АП Косова и Метохије) по градовима у периоду од 2000-2006. На основу ових података да се закључити да се експлозије у којима је коришћена експлозивна направа дешавају спорадично и да завређују посебну пажњу с обзиром на последице које остављају, те је самим тим и свако истраживање површинских експлозија од значаја.

Овај рад представља покушај давања доприноса у форензичкој обради места експлозије с обзиром на дефинисану шему поступања свих субјеката укључених у истраживање експлозије одн. форензичку обраду и анализу и поступак прибављања материјалних доказа за потребе суда уз поштовање стандардизације поступања на месту експлозије и ланца кретања доказа.

Овим радом је покушано да се направи известан помак у обради места експлозије и кроз потврду да се за снимање запремине кратера могу користити и уређаји новијег датума, конкретно 3Д скенер. За испитивање могућности коришћења 3Д скенера у обради места експлозије извршено је пробно скенирање једног кратера и одређивање његове запремине добијене на тај начин, као и класичним, до сада примењиваним методама. Стандардна процедура у форензичкој пракси подразумева мерење димензија кратера d_1, d_2 и h које касније служе за процену масе експлозива на основу расположивих емпиријских формула. У овом раду акценат је дат на запремини кратера с обзиром да различите масе експлозива, зависно од тога како је пуњење постављено, могу дати сличне вредности пречника кратера. Тако је запремина кратера на једном примеру одређивана на три начина: (1) апроксимацијом са запремином купе са основом елипсе; (2) изливањем тј. израдом гипсаног одливка и (3) 3Д скенирањем.

Гипсани одливак приказан је на Слици 33. док је поступак 3Д скенирања приказан на сликама 35 - 37. Крајњи производ скенирања приказан је кратер на сликама 38-42. У Табели 106. дат је упоредни приказ одређивање запремине кратера на три начина (апроксимација запремином купе, израдом гипсаног одливка и мерења његове запремине, скенирањем употребом 3Д скенера) и оцена прихватљивости сваког од тих начина појединачно са аспекта форензичке обраде места експлозије у циљу давања препоруке који је од ових начина најприхватљивији.

Табела 106. Упоредни приказ три начина одређивања запремине кратера (апроксимација запремином купе, израдом гипсаног одливка и мерења његове запремине, скенирањем употребом 3Д скенера) и оцена њихове прихватљивости

Р бр	**Одређ. запрем. кратера V_k**	**Прецизност одређив. V_k у земљи**	**Предности**	**Недостаци**	**Прихватљивост**
1	Апроксимација запремином купе	6% у односу на одливак, а 10% у односу на скенирану запремину	- најбржа метода -најједноставнија - најјефтинија - на лицу места се може добити вредност запремине кратера -погодна за примену у свим временским условима	- није у свим случајевима прихватљива (ако је кратер неправилног облика) -не може се добити прецизан профил кратера	задовољавајућа
2	Израда одливка на лицу места	Тачна запремина	- најпрецизнија - јефтина метода	- захтева доста времена - прљава метода - није савремена технологија -потпуно непрактична за веће кратере (захтева велику количину гипса и воде)	Непрактична метода
3	Примена 3Д скенера	4% у односу на запремину одливка	-релативно брза метода -примена савремених технологија -може се добити профил кратера	-скупа метода (набавка и одржавање опреме и пратећих софтвера, захтева обуку оператера) -није погодна за примену у свим временским условима - осетљива опрема -није једноставна за примену на неприступачним теренима јер захтева посебан извор енергије (агрегат)	задовољавајућа

Поређењем добијених вредности запремине применом скенера и израдом одливка дошло се до закључка да су разлике у добијеној вредности запремине веома мале. Упоредни преглед досада коришћених начина добијања запремине кратера (апроксимација кратера купом са основом круга/елипсе са мереним пречницима основе и висином, изливање кратера гипсом и мерење запремине одливка и 3Д скенирањем кратера) показује највећу прецизност мерења запремине кратера методом израде гипсаног одливка, док је примена 3Д скенера дала веома мала одступања (%) док је апроксимација купом дала највећа одступања. Предност ове методе је у томе што не изискује много опреме и времена и омогућава накнадну брзу процену вредности масе коришћеног експлозива.

Предност израде одливка у односу на обе методе је у изражавању финих детаља, што и није неопходно кад је у питању експлозија са кратером. Мана изливања кратера је у томе што је то процес који изискује време и непрактичан је у условима већих кратера (потребна је велика количина гипса и воде у случајевима већих кратера и време очвршћавања одливка је дуго – више од 2 сата). Предност 3Д скенера је у томе што је метод савременији и екипа за увиђаје након експлозија која га примењује одаје утисак веће стручности с обзиром на примену савремених технологија. Примена 3Д скенера на лицу места је једноставна и релативно брза (припрема десетак минута и само скенирање око 30 минута), а резултати су прецизни, али се захтева додатна обрада снимљеног материјала на рачунару ради израде 3Д модела места догађаја. Ово подразумева поседовање софтвера *ZScan* и *Geomagic* и, наравно, припадајућу обуку. Цена набавке и одржавања уређаја и опреме је висока. Погодни су за примену само у условима у којима нема атмосферских падавина.

У овом раду изведен је покушај увођења нове технологије – ИЦ снимања у обраду места експлозије, која отвара могућност примене различитих програма за обраду и анализу термалне слике.

9. ЗАКЉУЧЦИ

С обзиром на све већу експанзију тероризма уз коришћење ефеката експлозије за постизање циљева терориста, адекватан одговор надлежних државних институција подразумева и темељно познавање ефеката експлозије на окружење. Ово посебно у погледу актера форензичке обраде и форензичке анализе експлозије. Стога, свако истраживање ефеката експлозије на околину потенцијално је од великог значаја. Наиме, само квалитетно извршена форензичка обрада места експлозије и обављена анализа/вештачење омогућава прецизно одређивање узрока површинске експлозије уопште, па и у случају подметања непознатих направа са пуњењем од бризантног експлозива. У овом контексту посматрано, од изузетног значаја је и примена стандардних процедура поступања са материјалним доказима на месту експлозије, али и током каснијег руковања њима кроз дефинисање, успостављање и поштовање ланца кретања форензичких доказа на начин који онемогућава одбацивање прикупљених доказа на суду као неадекватних. Очекује се да поступање на месту експлозије по предложеној шеми да допринос већем проценту прихватања прикупљених доказа као адекватних.

Разматрања и предлози изложени у овом раду представљају покушај унапређења форензичке обраде места експлозије кроз предложену процедуру поступања на месту експлозије која би могла бити уведена и у домаћој пракси, а која је у складу са у свету устаљеном праксом праћења ланца кретања доказа. Такође, овим радом наглашена је и могућност и потреба увођења савремених уређаја у стандардну процедуру поступања на месту експлозије, а у циљу унапређења форензичке праксе. С обзиром да се у форензичкој пракси као метод за фиксирање трагова није користио 3Д скенер, овај рад је показао његову задовољавајућу примену на примеру кратера - последице површинске експлозије на подлози од растресите земље. Овај метод има и предности и мана у односу на до сада примењиване конвенционалне методе. Резолуција скенера одређује могућност приказивања финих детаља, који нису толико важни у случају кратера у односу на неке друге форензичке анализе. Упоредни приказ који је дат у табели приказује прецизност одређивања запремине у случају експлозије на земљи, а

нема разлога да то буде другачије и у случајевима осталих подлога. Метода је непрактична у случају постојања атмосферских падавина, због тога што изискује употребу самосталног извора струје (агрегата) на мање приступачним местима, као и због чињенице да изискује додатно време кроз неопходну обуку. Такође, цена коштања је висока. У односу на метод израде одливка овај метод има предност у томе што је чистији и његова примена одаје утисак већег нивоа стручности форензичара с обзиром на ниво праћења савремених технологија. Предност овог метода лежи и у чињеници да скенирањем добијени параметри информативно богатији и информатички погоднији за даљи рад.

Уз допринос дефинисању појма експлозије са аспекта форензике, очекивани допринос рада везан је и за изградњу стандарда и процедура који ће повећати доказни потенцијал и кредибилитет материјалних доказа фиксираних на месту експлозије. Уз то, циљ је и унапређење рада експерата за експлозије кроз предложени модел поступања свих релевантних субјеката на месту експлозије и анализи трагова експлозије у лабораторији.

Добијени експериментални резултати и реалних и нумеричких експеримената случајева површинских експлозија бризантних експлозива на различитим подлогама (земља, бетон и асфалт) показали су да се увек, сем када је било отказивања система за иницирање, након експлозије створио кратер. Постојање кратера на месту експлозије је чињеница која указује на то да је узрок експлозије експлозивно пуњење од бризантног експлозива, чиме је и потврђена да површинска експлозија разара и избацује део подлоге и ствара кратер на површини подлоге са којом је бризантни експлозив био у контакту. Одсуство кратера на месту експлозије указује на чињеницу да експлозија можда није била површинска тј. да је експлозив био на неком растојању од подлоге, или да узрок експлозије можда лежи у чињеници да је на лицу места била велика концентрација пара запаљивих течности или запаљивих гасова.

Такође, експерименти су показали да већа маса експлозивног пуњења, при површинској експлозији узрокује стварање кратера већих димензија, што је и логично. Зависност масе експлозива и запремине кратера у овом раду приказана је степеним функцијама.

Анализом експерименталних карактеристика кратера примећено је да већина кратера има 3-5 пута већи пречник од дубине.

У случајевима појединачних постављања експлозивних пуњења (када није увезивано више пуњења и када однос дужине и пречника/ширине пуњења није био већи од 6), експлозијом створен кратер био је сличан оном који би се створио сферним експлозивним пуњењем (основа кратера је кружна) што значи да је експериментално потврђена теорија *Livingston*. Ова теорија је потврђена и чињеницом да је, у случају када је при површинској експлозији коришћено пуњење настало надовезивањем више пуњења (када је однос дужине и пречника/ширине пуњења већи од 6), створен кратер са издуженијом основом – елипсом.

При површинској експлозији на тлу у истим условима (иста врста експлозива, иста геометрија и иста маса пуњења), а које је постављано на различите начине с обзиром на вредности контактне површине, уочавају се промене у изгледу основе и вредности запремине кратера. Експлозив постављен тако да дужа оса симетрије пуњења буде паралелна са подлогом и да експлозив дужом страном додирује подлогу (пример цилиндрично пуњење), створиће кратер веће основе и мање дубине у односу на кратер створен истим пуњењем окренутим вертикално (дужа оса симетрије кратера нормална на раван подлоге тј. пуњење својом најмањом страном додирује подлогу). Посматрањем, мерењем и анализом експериментално добијених кратера дошло се и до закључка да на облик и димензије кратера утицај има и контактна површина експлозивног пуњења и подлоге. Већа контактна површина између кратера и подлоге узрокује појаву кратера већег пречника. Утицај контактне површине на запремину кратера и процењену масу експлозива приказан је зависностима у облику степених функција.

Такође, експерименталне површинске експлозије показале су да густина као карактеристика тла утиче на величину кратера на тај начин што експлозија на мекшем и растреситијем тлу даје већи кратер (са растом густине тла смањује се запремина кратера).

Такође, кроз предложене моделе, у раду је потврђена хипотеза да карактеристике кратера, исказане преко димензија одн.запремине кратера зависе од карактеристика

коришћеног експлозива и подлоге (директна зависност запремине кратера од густине експлозива и контактне површине и обрнута зависност од густине подлоге),

Нумеричка симулација у *Abaqus*-у дала је резултате који не одступају у великој мери од експерименталних података. Такође, нумеричка анализа дала је податак да процес стварања кратера траје неколико *ms.* Карактеристике нумерички добијених кратера не одступају у великој мери од карактеристика експериментално добијених кратера. У поређењу резултата двеју нумеричких симулација (избор искључиво Ојлерових елемената и у другом случају спрегнутих Ојлерових и Лагранжових елемената) у случају површинске експлозије хоризонтално постављеног ТНТ пуњења масе 200g на земљу када је контактна површина максималне могуће вредности, нешто поузданији резултати добијају се избором искључиво Ојлерових елемената.

Уопштено говорећи, побољшање резултата добијених моделирањем могло би се постићи евентуалним избором мреже са већим бројем коначних елемената (*Mesh*) и пажљивијим избором чворних тачака у мрежи чије се координате користе за одређивање димензија кратера.

Нумеричка симулација би се могла користити и за предвиђање карактеристика кратера на основу познатих карактеристика експлозива и подлоге на којој се дешава површинска експлозија.

Постављене хипотезе о директној зависности масе коришћеног експлозива и карактеристика кратера (пречника, дубине одн.запремине) као и о директној зависности запремине кратера и контактне површине између подлоге и пуњења потврђене су кроз реалне експерименте, емпиријски модел, графички приказ модела урађеног на бази димензионе анализе, а који је рађен у MATLAB – у, као и нумерички модел у *Abaqus*-у.

Анализа добијених резултата овог истраживања обезбеђује ефикаснију прелиминарну процену масе коришћеног експлозива на основу карактеристика кратера за потребе форензичког инжењерства. Тако, сходно резултатима презентованим у раду очигледно је да се за прелиминарну процену масе коришћеног експлозива на основу димензија/запремине кратера могу користити предложене емпиријске зависности с тим да се мора рачунати на њихова одступања. Понуђене емпиријске зависности које дају везу између масе коришћеног експлозива и запремине кратера, а које представљају

резултат овог истраживања, дају прихватљива одступања. Може се закључити да се површинске експлозије могу моделирати релативно једноставним математичким изразима са прихватљивом прецизношћу. Такође, предложене функције урађене на бази димензионе анализе моделирају дате податке. Модел урађен на бази димензионе анализе може се побољшати пажљивијим избором експерименталних података, као и разматрањем да ли, евентуално, постоје неки други параметри које овај модел није узео у обзир. С тим у вези, могла би се претпоставити зависност масе коришћеног експлозива од више параметара. Подручје ваљаности предложених модела односи се на вредности малих маса експлозива.

Нумерички модел у *Abaqus* - у се може побољшати избором финије мреже коначних елемената. Такође, уколико је изводљиво, могла би се извршити и нумеричка анализа површинске експлозије у неком другом програму за моделирање динамичких процеса као нпр. AutoDYN.

Препоруке за даљи рад односе се и на прецизније дефинисање и мерење карактеристика подлоге на којој је пронађен кратер (укључујући и податке о чврстоћи, углу трења, процентуалном уделу честица земље, воде и ваздуха у земљаној подлози и сл.). Ради добијања прецизнијих закључака треба планирати више експеримената на истој подлози, као и што већи број експеримената површинске експлозије са истом масом експлозивног пуњења а различитом геометријом и вредношћу контактне површине. Такође, при евентуалном извођењу нових експеримената требало би изабрати више тачака за корелацију масе експлозива и карактеристика кратера нарочито на подлогама бетон и асфалт јер су то површине на којима се у пракси чешће дешавају експлозије (као нпр. у урбаним срединама). При експерименталним експлозијама требало би изабрати један геометријски облик експлозивног пуњења са одређеним односом пречника и дужине пуњења. У оквиру исте масе експлозива требало би варирати што више контактних површина и дати зависност контактне површине од димензија и запремине кратера. Након експерименталних експлозија требало би све кратере снимити термалном камером, а у циљу утврђивања времена експлозије на бази термалне слике. На термалној слици очитане вредности температуре у кратеру пре, непосредно након и након извесног протока времена у правилним размацима, од тренутка експлозије би на дијаграму $T[K]=f(t[s])$ могле би послужити за одређивање приближног тренутка када се догодила експлозија. У појединим

ситуацијама ово може бити веома значајна информација за увиђајну екипу која благовремено стигне на место експлозије.

Правци даљих истраживања односили би се и на дефинисање профила кратера у виду функције $f(x,y,z)=0$. Наиме, на основу изгледа контурне линије уздужног профила кратера може се претпоставити облик функције и поступком тзв.»фитовања» одредити математичка зависност која приближно описује облик кратера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abbasi, T., Pasman, H. J., Abbasi, S. A. (2010). A scheme of classification of explosions in the chemical process industry. *Journal of Hazardous Materials 174,* 270 – 280.
2. Adushkin, V., Khristiforov, B. (2004). Craters of Large-Scale Surface Explosions. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 40, 6, 674 - 678.
3. Алексић, Ж., Шкулић, М., Жарковић, М. (2004). *Лексикон Криминалистике*. Београд.
4. Ambrosini, D., Luccioni, B. (2006). Craters produced by explosions on the soil surface. *Journal of Applied Mechanics, ASME*, 73, 6, 890 - 900.
5. Ambrosini, D., Luccioni B., Danesi, R. (2004). Influence of the soil properties on craters produced by explosions on the soil surface. In: *Buscaglia, G., Dari, E., Zamonsky, O. (Eds.) Mec´anica Computacional,* Bariloche, Argentina, 23, 13.
6. Ambrosini, D., Luccioni, B, Jacinto, A., Danesi, R. (2005). Location and mass of explosive from structural damage. *Engineering Structures*, 27, 2, 167 - 176.
7. Ambrosini, R. D. Luccioni, B.M., Danesi, R. F., Riera, J.D., Rocha, M.M. (2002). Size of craters produced by explosive charges on or above the ground surface. *Shock Waves*, 12, 69 – 78.
8. Anirban, D. (2012). Numerical simulation of surface explosion over dry, cohesionless soil. *Computers and Geotechnics*, 43, 72 – 79.
9. Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.W., Kulesz, J.J., Strehlow, R.A. (1983). *Explosive hazards and evaluation*, In: Fundamental studies in engineering 5, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
10. Beveridge, A. (1998). *Forensic Investigation of Explosion*. Boca Raton: CRC Press.
11. Batterman, S.C., Batterman S.D. (2006). *Forensic engineering and Science*. In: Forensic science and law – investigative applications in criminal, civil, and family justice, (Ed.) Wecht, C.H., Rago, J.T. Boca Raton: CRC Press LLC.
12. Бјеловук, И. (2005). Обрада трагова након експлозије непознате направе, *Безбедност*, 47, 2, 302-310.
13. Bjelovuk, I. Jaramaz, S., Elek, P., Micković, D., Kričak, L. (2013) Preliminary Estimation of the Explosive Mass Based on the Crater Resulting From the Surface Explosion on Asphalt. *Strojarstvo,* 55 (3) 203-210

14. Bjelovuk, I. Jaramaz, S., Elek, P., Micković, D., Kričak, L. (2015) Modelling of the characteristics of crater emerged from the surface explosion on the soil. Combustion, Explosion & Shock Waves, (3) (у штампи)
15. Bjelovuk, I. Jaramaz, S., Elek, P., Micković, D., Kričak, L. (2015) Estimation of the Explosive Mass Based on the Surface Explosion Crater on Asphalt. Technical Gazette, 22 (1) (у штампи)
16. Bjelovuk, I., Jaramaz, S., Kričak, L. (2012). The Significance of Crater for Determining Explosion Cause in Forensic Engineering. *In: Editors: Nikač, Ž., Milašinović, S., Simović, D., Bošković, G. International Scientific Conference "Archibald Reiss Days"*, Belgrade: Serbia, 1-2 March, 2012, p. 913-929.
17. Bjelovuk, I.D., Jaramaz, S., Micković, D. (2012). Estimation of explosive charge mass used for explosions on concrete surface for the forensic purpose. *Science & Justice*, 52, 1, 20 – 24.
18. Bjelovuk, I., Kesić, T., Žarković, M. (2013). Consequences of explosive devices' activation on victims and their criminal justice importance. *In: Eds. G. Meško, A. Sotlar, J. Greene, The ninth biennial internatonal conference criminal justice practice and research.* Ljubljana: Faculty of Criminal Justice and Security.
19. Бјеловук, И. (2005). *Форензичка карактеризација трагова дејства бризантних експлозива на подлогу и околину* (магистарски рад одбрањен на Машинском факултету Универзитета у Београду).
20. Brenner, J. C. (Eds.). (2004). *Forensic Science An Illustrated Dictionary*. Boca Raton: CRC Press LLC.
21. Bulson, P. S. (1997). *Explosive Loading of Engineering Structures*. London: E&FN SPON.
22. Carper, K. (2001). *Forensic Engineering*. Boca Raton: CRC Press LLC.
23. Choi, S., Wang, J., Munfakh, G., Dwyre, E. (2006). 3D nonlinear blast model analysis for underground structures. In: *Proc GeoCongress*. Atlanta.
24. Cooper, H. F. (1976). *Estimates of crater dimensions for near-surface explosions of nuclear and high-explosive sources*, (Thesis, Lawrence Livermore Laboratory, University of California).
25. Cooper, P. (1996). *Explosive`s Engineering*. New York: Willey – VCH.
26. Cooper, P., Kurowski, S. (1996). *Introduction to the Explosives*. New York: Willey – VCH.

27. Davis, R., Facey, O., Hamer, P. and Rudram D. (1997). Interpretation of scientific evidence. *Science & Justice, 37,* 64.
28. Evans, C. (1996). *The Casebook of Forensic Detection – How Science Solved 100 of the World`s Most Baffling Crimes.* New York: John Willey and Sons.
29. Ficket, W., Davis, W. C. (1979). *Detonation - Theory and Experiment*. New York: Doyer Publications.
30. Fussner, W., Baltes, M., Cason, S., Lin, S., Schroeder, I. (2011). *Modeling Depth of Craters Created by a High Explosive*. Преузето 12. 7. 2012. са: http://www.infohost.nmt.edu/~jstarret/Fall2011/430/OldProjects/Team2Crater.pdf
31. Garbolino, P., Taroni, F. (2002). Evaluation of scientific evidence using Bayesian networks. *Forensic Science International*, 125, 2 - 3, 149 – 155.
32. Gee, D. J., Reinecke, W. G., Levinson, S. J. (2007). Blast phenomena associated with high speed impact, *International Journal of Impact Engineering, 34*, 178-188.
33. Giordano, F., Weir, M., Fox, W. (2003). *A First Course in Mathematical Modeling.* 3rd edition, Thomson Learning Asia and China Machine Press.
34. Girard, J. E. (2008). *Criminalistics, Forensic Science and Crime.* Massachusetts: Jones and Bartlett Publishers.
35. Hamlet, J., Overton, M., Kooi, J., Stephenson, C., Montgomery, S. (2006). *Explosive Crater Depth.* Преузето 13. 08. 2011. са: http://infohost.nmt.edu/~starret/Fall2010/430/OldProjects/Team1Crater.pdf.
36. Hargather, M.J., Settles, G.S. (2009) Laboratory scale techniques for the measurement of a material response to an explosive blast. *International Journal of Impact Engineering*, *36*, 940 – 947.
37. Henrych, J. (1979). *The Dynamics of Explosion And its use.* Amsterdam.
38. Hiermaier, S. (2009). *Predictive Modelling of Dynamic processes*. Springer.
39. Holsapple, K. A. (1987). The scaling of impact phenomena. *International Journal of Impact Engineering*, 5, 343 - 355.
40. http://chemistry.about.com/od/factsstructures/ig/Chemical-Structures---T/Trinitrotoluene-or-TNT.htm, доступан 12.4.2012.
41. http://chemistry.about.com/od/factsstructures/ig/Chemical-Structures---/PETN.htm, доступан 12.4.2012.
42. http://rgn.hr/~pkvasnic/MehanikaTla_2007, доступан 25.8.2011.
43. http://www.zcorp.com/documents/688_ZScannerBrochUS%20Single%20page%20setup.pdf доступан: 01.06.2011.

44. http://www.sirchie.com/ доступан 14.02.2012.
45. http://www.dojes.com/ доступан 14.02.2012.
46. http://www.zcorp.com/documents/588_3D%20Scanning%20to20Go%20eBook%20FINAL.pdf доступан 13.8.2011.
47. http://www.3gsm.at/downloads/JMX_PanoramaScanner_en2.pdf, доступан 04.02.2012.
48. http://www.3gsm.at , доступан 31.01.2012.
49. http://keith.aa.washington.edu/craterdata/scaling/index.htm, доступан 21.1.2008.
50. http://keith.aa.washington.edu/craterdata/scaling/theory.pdf доступан 21.1.2008.
51. http://keith.aa.washington.edu/craterdata/scaling/index.htm доступан 21.1.2008.
52. http://www.enfsi.com доступан 15.2.2012.
53. *Ilustrovani engleski rečnik*. Oxford. (2002). (Z. Šelmić, prev. Novi Sad: Mladinska knjiga nova.
54. Ivanov, B. A. (2003). Complex Crater Formation: Verification of Numerical Models, *Results of the Workshop on Impact Cratering: Bridging the Gap Between Modeling and Observations*, Houston, Texas, преузето 22. 08. 2011. са www.lpi.usra.edu/publications/reports/CB-1162-fullreport.pdf
55. Iturrioz, I., Riera, J. (2001). Numerical study of the effect of explosive sources near the ground surface: crater formation. *Transactions, SMiRT 16*, Washington DC.
56. Jaramaz, S. (1997). *Physics of explosion*. Belgrade: University of Belgrade, Mechanical Engineering Faculty.
57. Jaramaz, S. (2000). *Warheads Design and Terminal Ballistics*. Belgrade: University of Belgrade, Mechanical Engineering Faculty.
58. Jones, D. A., Kemister, G., Borg, R. A. J. (1998). *Numerical Simulation of Detonation in Condensed Phase Explosives*. Melbourne: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory.
59. Јовић, М. (2008). *Кривично право-општи део*. Београд
60. Kay, L., Podoleanu, A., Seeger, M., Solomon, C. J. (1997). A New Approach to the Measurement and Analysis of Impact Crater. International Journal of Impact Engineering, 19, 8, 739 - 753.
61. Kennedy, P. M., Kennedy, J. (1990). *Explosion Investigation and Analysis. Kennedy on Explosions*. Chicago: Investigation Institute.
62. Клајн, И., Шипка, М. (2000). *Велики речник страних речи и израза*. Нови Сад: Прометеј.

63. Knox, J. B., Terhune, R. W. (1964). Calculation of explosion produced craters. U: *Engineering with nuclear explosives, proceedings of the 3rd Plowshare Symposium, US Atomic energy commission/Division of technical information,* (75-91). Livermore, California and San Francisco: University of California, Lawrence Radiation Laboratory.
64. Коларевић, Д. (2008). Форензичка наука и криминалистика. *Nauka – bezbednost – policija. NBP Journal of Criminalistics and Law, 13,* 121–138.
65. Корајлић, Н. (2009). *Криминалистичка методика откривања, разјашњавања и доказивања експлозија*. Сарајево: Центар за сигурносне студије.
66. Кривични законик Републике Србије ("Сл. Гласник РС", бр. 85/2005, 88/2005 – испр., 107/2005 – испр. и 72/2009, 111/2009, 121/2009 и 104/2013)
67. Lahiri, S.K., Ho, L., Simulation of rapid structural failure due to blast loads from conventional weapons (CONWEP), преузето 31. 07. 2012. са: http://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS/SIMULIA/pdf/conference-papers/NAFEMS-Def-Blast-Loading-due-conventional-weapons.pdf
68. Lee, H. (1998). *Materijalni tragovi.* (prev. Physical evidence.) Zagreb: Ministarstvo unutarnjih poslova Republike Hrvatske.
69. Lee, H. C., Harris, H. A. (2000). *Physical Evidence in Forensic Science.* Tucson, Arizona: Lawyers & Judges Publishing Co., Inc.
70. Lees, F. P. (1996). *Lees`Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 2: Hazard Identification, Assesment and Controll, Ch. 17 – Explosion.* (2nd Edition) Butter Worth-Heinemann: Elsevier.
71. Lenox, E. (2011). Application of digital photogrammetry to crater measurement for shallow buried, surface, and small height of burst explosions, преузето 15.11.2011. са http://www.dtra.mil/dtru/documents/V1_1/Lenox_DP-CRATERING_DTRU.pdf
72. Липовац, К., Бјеловук, И., Нешић, М. (2010). Примена савремених уређаја и опреме у форензичкој обради места догађаја. (28-37). У: *Друго саветовање Право и форензика у криминалистици у Крагујевцу*, Београд: Криминалистичко-полицијска академија.
73. Liu, Y., Huang, F., Zhang, Z. (2008). Numerical simulation in double layer medium of concrete and soil. *Journal of BeiJing Institution of Technology, 17,* 4, 384 - 387.
74. Luccioni, B., Ambrosini, D. (2010). Numerical assessment of blast effects scaling procedures. *Mecanica Computacional*, 29, 1161 – 1179.

75. Luccioni, B., Ambrosini, D., Nurick, G., Snyman, I. (2009). Craters produced by underground explosions, *Computers & Structures, 87,* 21 – 22, 1366-1373.
76. Luccioni, B. M., Ambrosini, R. D., Danesi, R. F. (2004). Analysis of building collapse under blast loads, *Engineering Structures, 26*, 63–71.
77. Luccioni, B., Ambrosini, D., Danesi, R. (2006). Blast load assessment using hydrocodes, *Engineering Structures, 28*, 1736–1744.
78. Luccioni, B., Ambrosini, D., Chung Kim Yuen S., Nurick, G. (2010). Effects of large and spread explosive loads, *International Journal of Protective Structures, 1*, 3, 319 - 344.
79. Luccioni, B. M., Ambrosini, R. D. (2004). Effect of Burried Explosions. Преузето 28.6.2012. са: http://www.famf.unc.edu.ar/~torres/trabajosparapublicacion/23_simposio_homenaje_al_dr_carlos_prato/23-simposio_homenaje_prato-27.pdf
80. Luccioni, B. M., Ambrosini, R. D. (2008). Evaluating the Effect of Underground Explosions on Structures, In: A. Cardona, M. Storti, C. Zuppa (Eds.), *Meca`nica Computacional*, 27, 1999 – 2019. San Luis.
81. Mader, C. (1979). *Numerical Modeling and Detonations*. California: University of California Press, Berkeley and Los Angeles.
82. Максимовић, Р., Бошковић, М., Тодорић, У. (1998). *Методе физике, хемије и физичке хемије у криминалистици*. Београд: Полицијска академија.
83. Максимовић, Р., Тодорић, У. (1995). *Криминалистика техника*. Београд: Полицијска академија.
84. Martin, R., Reza, A., Anderson, L. (2000). What is an explosion? A case history of an investigation for the insurance industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13*, 491 – 497.
85. Машковић, Љ., (2010). *Криминалистичка техника* – електронски оптички диск (CD-ROM). Београд: Криминалистичко-полицијска академија.
86. Melosh, H. J. (1985). Impact cratering mechanics: Relationship between the shock wave and excavation flow. *Icarus, 62*, 2, 339 – 343.
87. Merrifield, R. (2000). Fire and explosion hazards to flora and fauna from explosives. *Journal of Hazardous Materials A74,* 149–161.
88. Milošević, M., Bjelovuk, I., Kesić, T. (2009). Quality Management System in Forensic Laboratories. *Nauka – bezbednost – policija. NBP Journal of Criminalistics and Law, 14*, 2, 1-10.

89. Митровић, В., Ступар, Љ., (2002). *Криминалистика техника*. Београд: ВШУП.
90. Мићић, Р. (1992). *Експлозивне материје-технички приручник*. Београд: Институт Безбедности.
91. Nagy, N. M., Eltehawy, E. A., Elhanafy, H. M., Eldesouky, A. (2009). Numerical Modeling of Geometrical Analysis for Underground Structures, In: *Proceedings of 13th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology, ASAT-13***,** Cairo.
92. Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., Ramsay, J. (2007). Blast loading and blast effects on structures – An overview, *EJSE Special Issue: Loading on structures*, 76-88, преузето 30. 05. 2012. са: http://www.ejse.org/Archives/Fulltext/2007/Special/200707.pdf
93. Neuberger, A., Peles, S., Rittel, D. (2007). Scaling the response of circular plates subjected to large and close-range spherical explosions. Part I: Air-blast loading. *International Journal of Impact Engineering, 34*, 859 – 873.
94. Noon, R. K. (2001). *Forensic Engineering.* Boca Raton: CRC Press LLC.
95. Nordyke, M. (1964). Cratering experience with chemical and nuclear explosives. Engineering with nuclear explosives. In: *Proceedings of the 3rd Plowshare Symposium, US Atomic energy commission/Division of technical information,* 51 - 71, Livermore, California and San Francisco: University of California, Lawrence Radiation Laboratory.
96. Nurick, G. N., Chung Kim Yuen, S., Jacob, N., Verster, W., Bwalya, D., Vara, A. R. (2006). Response of quadrangular mild-steel plates to large explosive load. In: *Second international conference on design analysis of protective structures, (DAPS).* 30 – 44, Nanyang Technological University.
97. Omang, M., Christensen, S. O., Borve, S., Trulsen, J. (2009). Height of burst explosions: a comparative study of numerical and experimental results. *Shock Waves, 19*, 135 – 143.
98. Петровић, Д. (2001). Структура експлозивне енергије при минирању. У: *Зборник радова са другог југословенског симпозијума са међународним учешћем*, Бушење и минирање, 7-14.
99. Plaatt, R. (2003). *Crime Scene – The Ultimate Guide To Forensic Science*. London.
100. Покровский, Г. И. (1980). *Взрыв*. Москва: Недра.

101. Покровский, Г. И., Федоров, И. С. (1957). *Действие удара и взрыва в деформируемых средах*. Москва: Государственное издательство литературы по строительным материалам.
102. Поштић, П., Тошић, Д., Бендерац, Р., Јовановић, Ђ., Ђорђевић, Д., Радовановић, Љ., Милошевић, Б., Кликовац, Љ. (1998). *Основи противдиверзионе заштите*. Београд: Министарство унутрашњих послова - Институт Безбедности.
103. Qin-yong, M., Mei-feng, C. (2003). Determination of Similarity of Explosives for a Model Experiment. *Combustion, Explosion and Shock Waves, 39*, 5, 606-609.
104. Радић, В. (2011). *Опасне материје*. Београд: ПанПласт.
105. Remennikov, A. (2003). A Review of Methods for Predicting Bomb Blast Effects on Buildings. *Journal of Battlefield Technology, 6*, 3, 5-10.
106. *Руско-српски речник*. (1998). (Б. Станковић, уред.), Нови Сад: Матица српска.
107. Saferstein, R. (2007). *Criminalistics: An Introduction to Forensic Science*. New York: Pearson International Edition, Prentice Hall.
108. Schmidt, R., Housen, K. Problem solving with dimensional analysis. *The Industrial Physicist*, 21-24, преузето 30.5.2007. са http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-1/iss-1/p21.pdf
109. Schmidt, R. M., Housen, K. R. (1987). Some recent advances in the scaling of impact and explosion cratering. *International Journal of Impact Engineering*, *5*, 1–4, 543-560.
110. Симоновић, Б. (2004). *Криминалистика*. Крагујевац: Правни факултет, Институт за правне и друштвене науке.
111. Симоновић, В. (1995). *Нумеричке методе*. Београд:Машински факултет.
112. Симоновић, В. (1995). *Увод у теорију вероватноће и математичку статистику*. Београд.
113. Smith, P. D., Hetherington, J. G. (1994). *Blast and Ballistic loading of Structures*. Oxford.
114. Specter, M. M. (1987). National Academy of Forensic Engineers. *Journal of Performance of Constructed Facilities, (ASCE), 1*, 3. Carper, K. (2001). *Forensic Engineering*. Boca Raton: CRC Press LLC.
115. Стаматовић, А. (1996). *Физика експлозије*. Београд.
116. Суботић, П. (2002). *Приручник за асфалт*. Београд: Институт за путеве.

117. Szuladzinsky, G. (2010). *Formulas for mechanical and structural shock and impacts*. Boca Raton: CRC Press.
118. Taroni, F., Aitken, C., Garbolino, P., Biedermann, A. (2006). *Bayesian Networks and Probabilistic Inference in Forensic Science.* London: John Wiley & Sons.
119. Tu-qiang, Y. E. (2008). Field experiment for blasting crater. *Journal of China University of Mining & Technology, 18,* 0224 – 0228.
120. Водинелић, В. (1984). *Криминалистика*. Београд: Савремена администрација.
121. Вујаклија, М. (1980). *Лексикон страних речи и израза*. Београд: Просвета.
122. Wang, J. (2001). Simulation of landmine explosion using LS-DYNA3D software: benchmark work of simulation of explosion in soil and air. Australia: DSTO Aeronaut and Marit Res Lab.
123. Wecht, C.H., Rago, J.T. (Ed.). (2006). *Forensic Science and Law – Investigative Applications in Criminal, Civil, and Family Justice*. Boca Raton: CRC Press LLC.
124. www.bvda.com доступан 14.02.2012.,
125. www.projectina.ch доступан 14.02.2012.
126. Yallop, H. J., Kind, S. S. (1980). *Explosion Investigation*. Edinburgh: The Forensic Science Society, Harogate, England and Scotish Academic Press.
127. Yang, R., Bawden, W.F., Katsabanis P.D. (1996). A New Constitutive Model for Blast Damage. *International Journal of Rock Mechanics and Minning Science &Geomechanics, 33,* 3, 245-254.
128. Жарковић, М. (2005). *Кривичнопроцесни и криминалистички аспекти увиђаја на месту догађаја*. Београд.
129. Žarković, M., Bajagić, M., Bjelovuk, I. (2010). Specifics within the crime scene investigation of an explosion site in the case of a suicide terrorism act. In: (Eds. G. Meško, A. Sotlar, J. Winterdyk) *Proceedings of the conference „Policing in Central and Eastern Europe – Social Control of Unconventional Deviance*“, Ljubljana, 497-521.
130. Жарковић, М., Бјеловук, И., Кесић, Т., (2012). *Криминалистичко поступање на месту догађаја и кредибилитет научних доказа – монографија.* Београд: Криминалистичко-полицијска академија.
131. Жарковић, М., Бјеловук, И., Нешић Л. (2010). Научни докази и улога вештака у кривичном поступку – европски стандарди квалитета. *Зборник радова са научно-стручног скупа са међународним учешћем: Сузбијање криминала и*

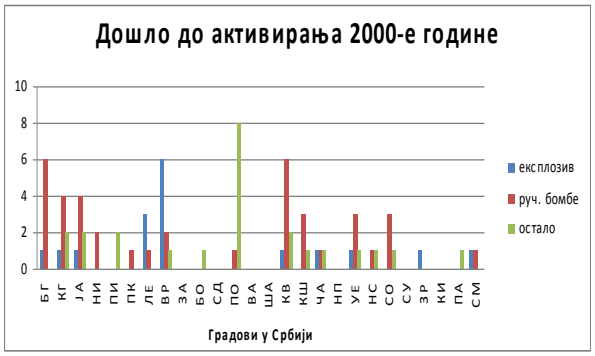
европске интеграције, Тара, 235-244, Београд: Криминалистичко-полицијска академија и Ханс Зајдел фондација.

132. Жарковић, М., Кесић, Т., Бјеловук, И. (2011). Савремене тенденције у вештачењу као облику међународне кривичноправне помоћи. У: *Зборник радова са другог научно-стручног скупа са међународним учешћем: Сузбијање криминала у оквиру међународне полицијске сарадње, Тара,* 29-37, Београд: Криминалистичко-полицијска академија и Ханс Зајдел фондација.

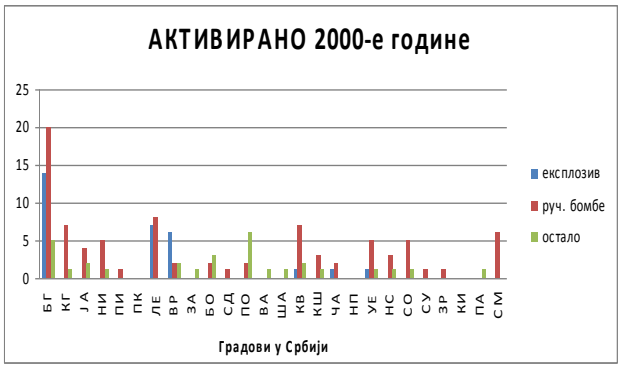
133. Законик о кривичном поступку Републике Србије, Службени гласник РС, бр.72/2011, 101/2011, 121/2012, 32/2013, 45/2013 и 55/2014.

ПРИЛОЗИ

ПРИЛОГ 1: Број случајева експлозија на територији Републике Србије по градовима у периоду од 2000. закључно са 2006. годином



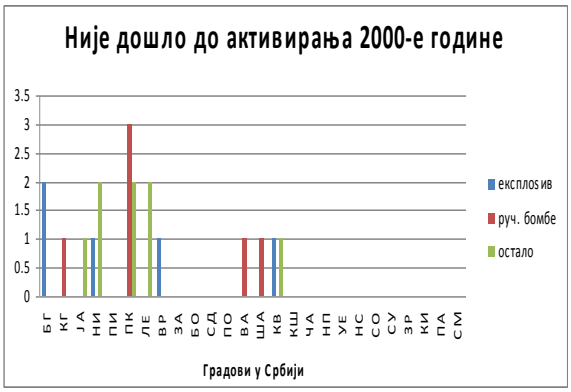
Сл.1. Број подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих је дошло до активирања у Србије по градовима 2000.



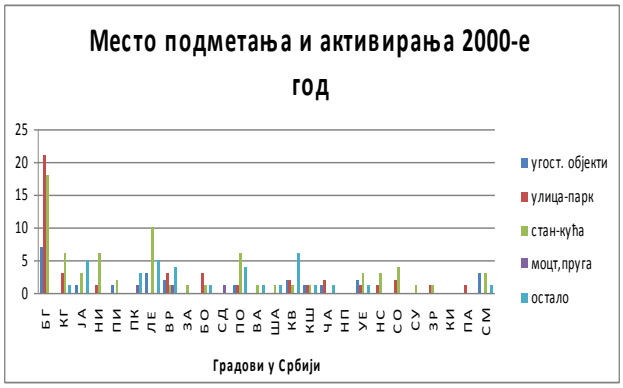
Сл.2. Број експлозивних средстава активираних бацањем исл. на територији Републике Србије по градовима 2000.



Сл.3. Последице које су изазвал активирана експлозивна средства–број погинулих, лица са тешким и лаким телесним повредама по градовима Србије у 2000.



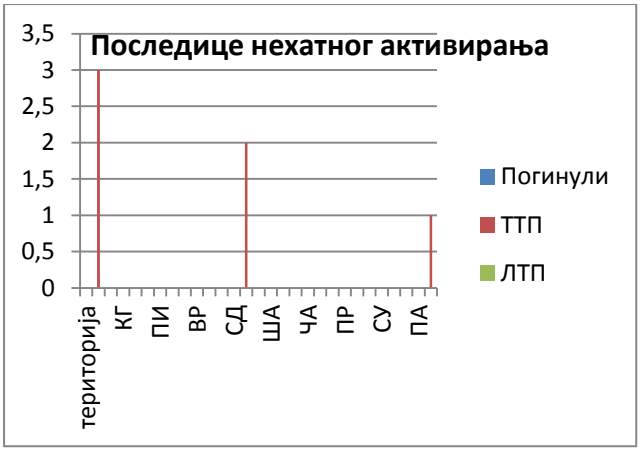
Сл.4. Број подметнутих средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих није дошло до активирања на територији Србије по градовима 2000. г



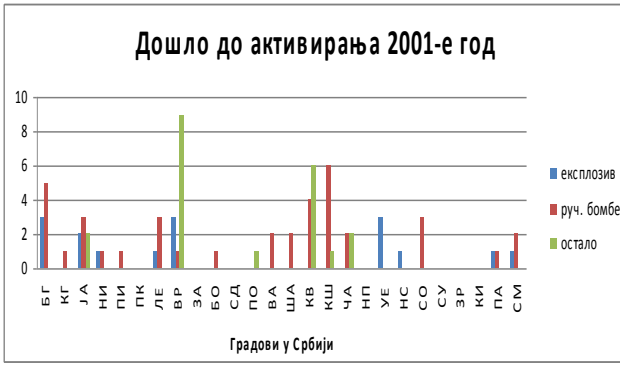
Сл.5. Број подметнутих експлозивних средстава на различитим местима–у угост. објектима, на улици/у парку, у становима/кућама, на мостовима/пругама и остало у Србији по градовима 2000.



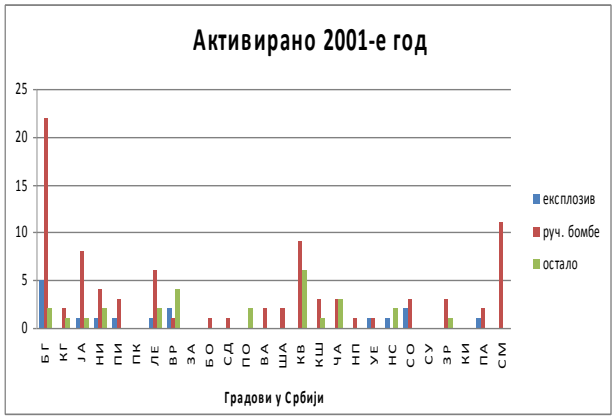
Сл.6. Броја подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих је дошло до нехатног активирања на територији Републике Србије по градовима 2000. године



Сл. 7 Последице нехатног активирања експлозивних средстава на територији Србије по градовима у 2000.



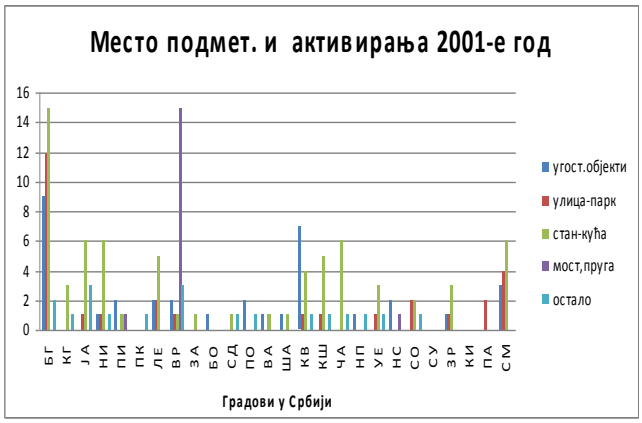
Сл.8. Број подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих је дошло до активирања на територији Србије по градовима 2001.



Сл.9. Број активираних експлозивних средстава бацањем исл. на територији Србије по градовима 2000.



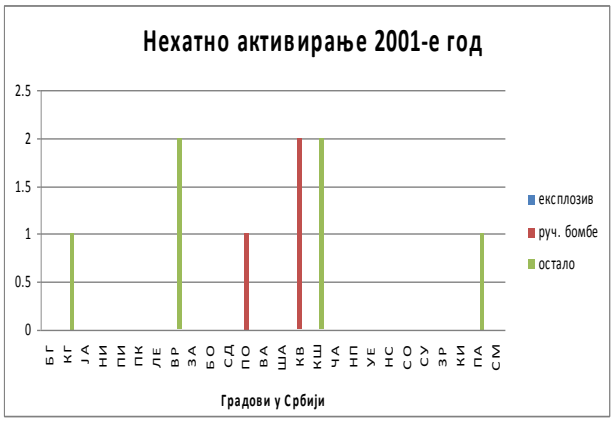
Сл.10. Број подметнутих средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих није дошло до активирања на територији Србије по градовима 2001.



Сл.11. Број подметнутих средстава на различитим местима – у угоститељским објектима, на улици/у парку, у становима/кућама, на мостовима/пругама и остало у Србији по градовима 2001.



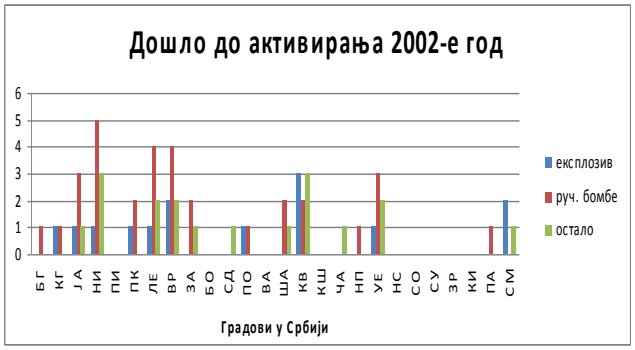
Сл.12. Последице које су изазвала подметнута и активирана експлозивна средства – број погинулих, лица са тешким и лаким телесним повредама по градовима Србије у 2001.



Сл.13. Број подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих је дошло до нехатног активирања у Србији по градовима 2001.



Сл.14. Последице нехатно активираних експлозивних средстава – број погинулих, лица са тешким и лаким телесним повредама по градовима Србије у 2001.



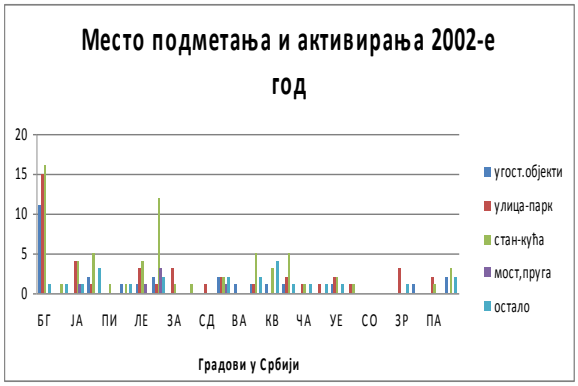
Сл.15. Број подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих је дошло до активирања на територији Србије по градовима 2002.



Сл.16. Број подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих није дошло до активирања у Србији по градовима 2002.



Сл.17. Број активираних експлозивних (става бацањем исл. на територији Републике ије по градовима 2002.



Сл.18. Број подметнутих средстава на различитим местима – у угоститељским објектима, на улици/у парку, у становима/кућама, на мостовима/пругама идр у Србији по градовима 2002.



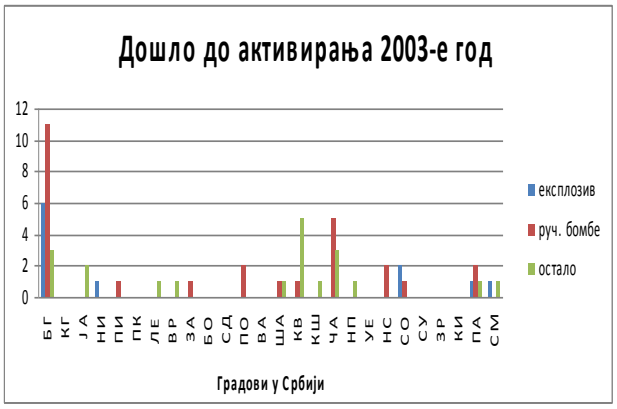
Сл.19. Последице које су изазвала подметнута и активирана експлозивна средства – број погинулих лица, лица са тешким и лица са лаким телесним повредама по градовима Србије у 2002.



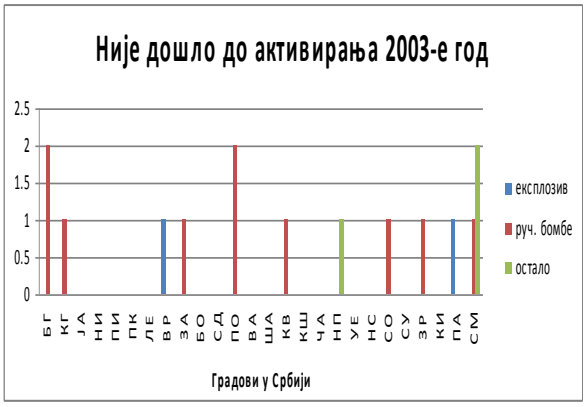
Сл.20. Број подметнутих средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих је дошло до нехатног активирања на територији Србије по градовима 2002.



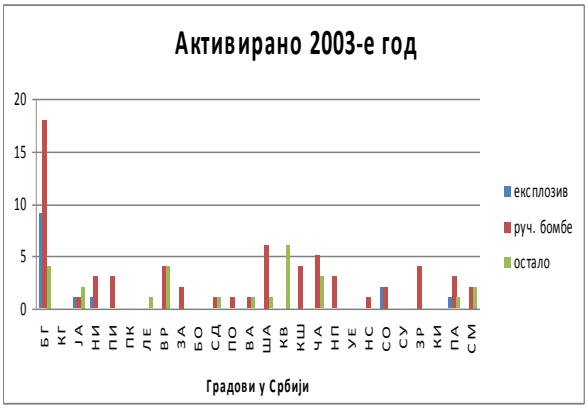
Сл.21. Последице нехатно активираних експлозивних средства – број погинулих, лица са тешким и лаким телесним повредама по градовима Србије у 2002.



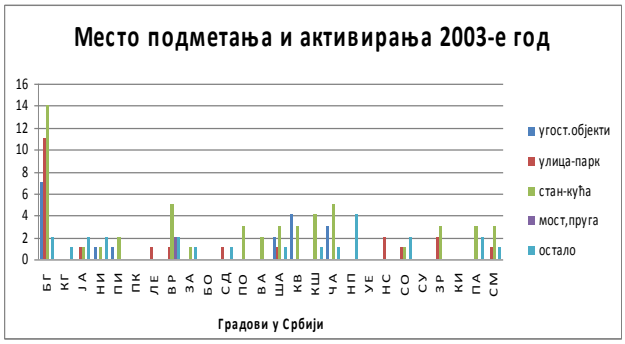
Сл.22. Броја подметнутих средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих је дошло до активирања на територији Србије по градовима 2003.



Сл.23 Броја подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих није дошло до активирања на територији Србије по градовима 2003.



Сл.24. Број активираних експлозивних средстава бацањем исл. на територији Србије по градовима 2003.



Сл.25. Број подметнутих експлозивних средстава на различитим местима – у угоститељским објектима, на улици/у парку, у становима/кућама, на мостовима/пругама и остало у Србији по градовима 2003.



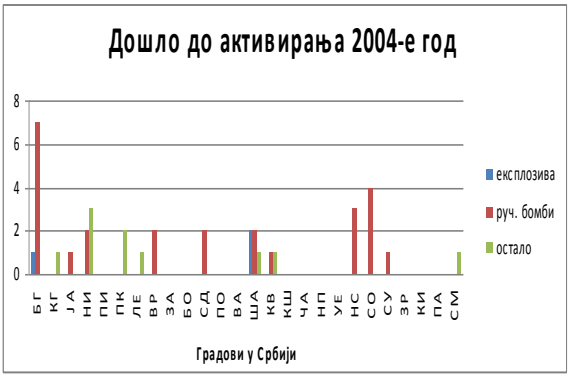
Сл.26. Последице подметнутих и активираних средства – број погинулих, лица са тешким и лаким телесним повредама по градовима Србије у 2003.



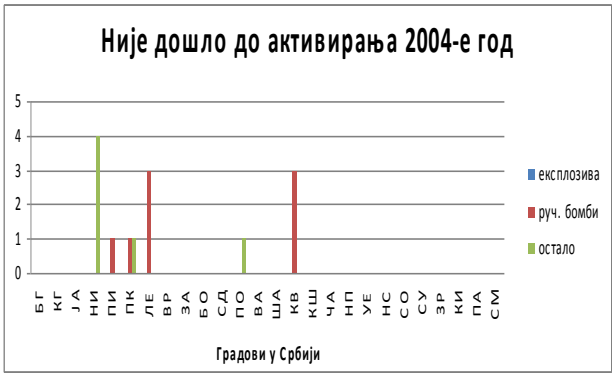
Сл.27. Број подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих је дошло до нехатног активирања на територији Србије по градовима 2003.



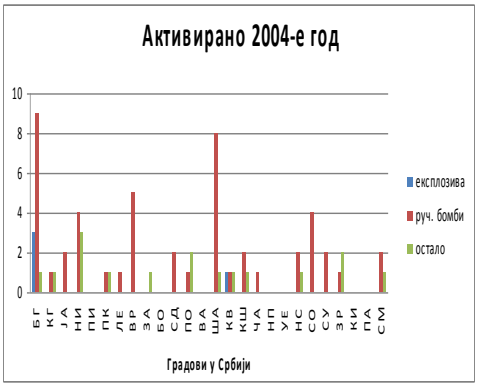
Сл.28. Последице које су изазвала нехатно активирана експлозивна средства – број погинулих лица, лица са тешким и лица са лаким телесним повредама по градовима Србије у 2003.



Сл.29. Број подметнутих експлозивних ;става (експлозив, ручна бомба М75 и ло) код којих је дошло до активирања на торији Србије по градовима 2004.



Сл.30. Број подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих није дошло до активирања на територији Србије по градовима 2004.



Сл.31. Број активираних експлозивних средстава бацањем исл. на територији Србије по градовима 2004.



Сл.32. Број подметнутих средстава на различитим местима – у угоститељским објектима, на улици/у парку, у становима/кућама, на мостовима/пругама и остало у Србији по градовима 2004



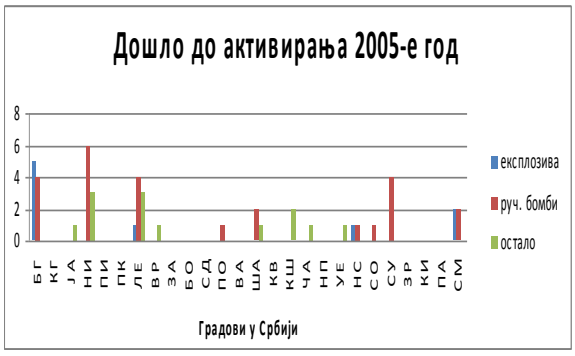
Сл.33. ПоследицЕ које су изазвала подметнута и активирана експлозивна средства – број погинулих, лица са тешким и лаким телесним повредама по градовима Србије у 2004.



Сл.34. броја подметнутих средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих је дошло до нехатног активирања на територији Србије по градовима 2004.



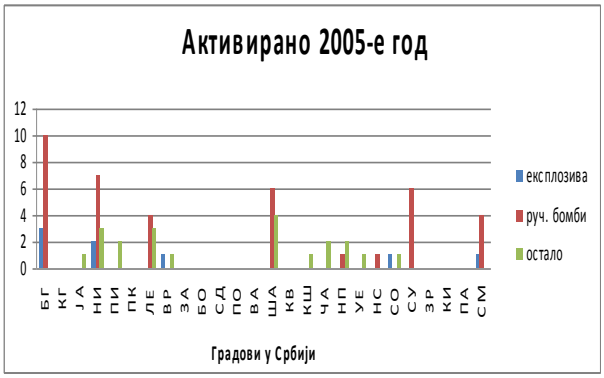
Сл.35. Последица које су изазвала нехатно активирана експлозивна средства – број погинулих лица, лица са тешким и лица са лаким телесним повредама по градовима Србије у 2004.



Сл.36. Приказ броја подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих је дошло до активирања на територији Србије по градовима 2005.



Сл.37. Број подметнутих средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих није дошло до активирања на територији Србије по градовима 2005.



Сл.38. Приказ броја активираних средстава бацањем исл. на територији Републике Србије по градовима 2005. године



Сл.39. Број подметнутих експлозивних средстава на различитим местима – у угоститељским објектима, на улици/у парку, у становима/кућама, на мостовима/пругама и остало на територији Србије по градовима 2005.



Сл.40. Последице које су изазвала подметнута и активирана експлозивна средства – број погинулих лица, лица са тешким и лица са лаким телесним повредама по градовима Србије у 2005.



Сл.41. Број подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих је дошло до нехатног активирања на територији Србије по градовима 2005. године



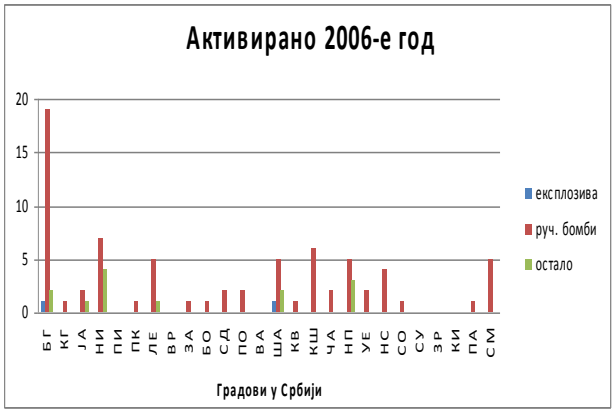
Сл.42. Последица које су изазвала нехатно активирана експлозивна средства – број погинулих, лица са тешким и лаким телесним повредама по градовима Србије у 2005.



Сл.43. Број подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих је дошло до активирања на територији Србије по градовима 2006.



Сл.44. Број подметнутих експлозивних средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих није дошло до активирања на територији Србије по градовима 2006.



Сл.45. Број активираних експлозивних средстава бацањем исл. на територији Републике Србије по градовима 2005. године



Сл.46 Број подметнутих средстава на различитим местима – у угоститељским објектима, на улици/у парку, у становима/кућама, на мостовима/пругама и остало у Србији по градовима 2006.



Сл.47. Последице подметнутих и активирана експлозивна средства – број погинулих, лица са тешким и лаким телесним повредама по градовима Србије у 2006.



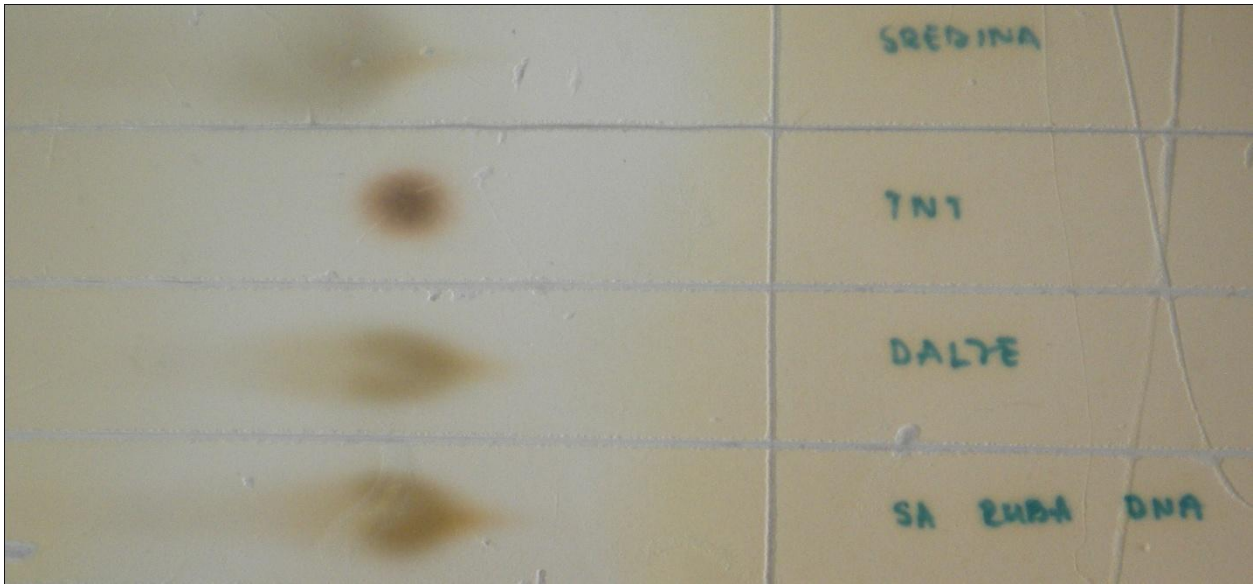
Сл.48. Број подметнутих средстава (експлозив, ручна бомба М75 и остало) код којих је дошло до нехатног активирања на територији Србије по градовима 2006.



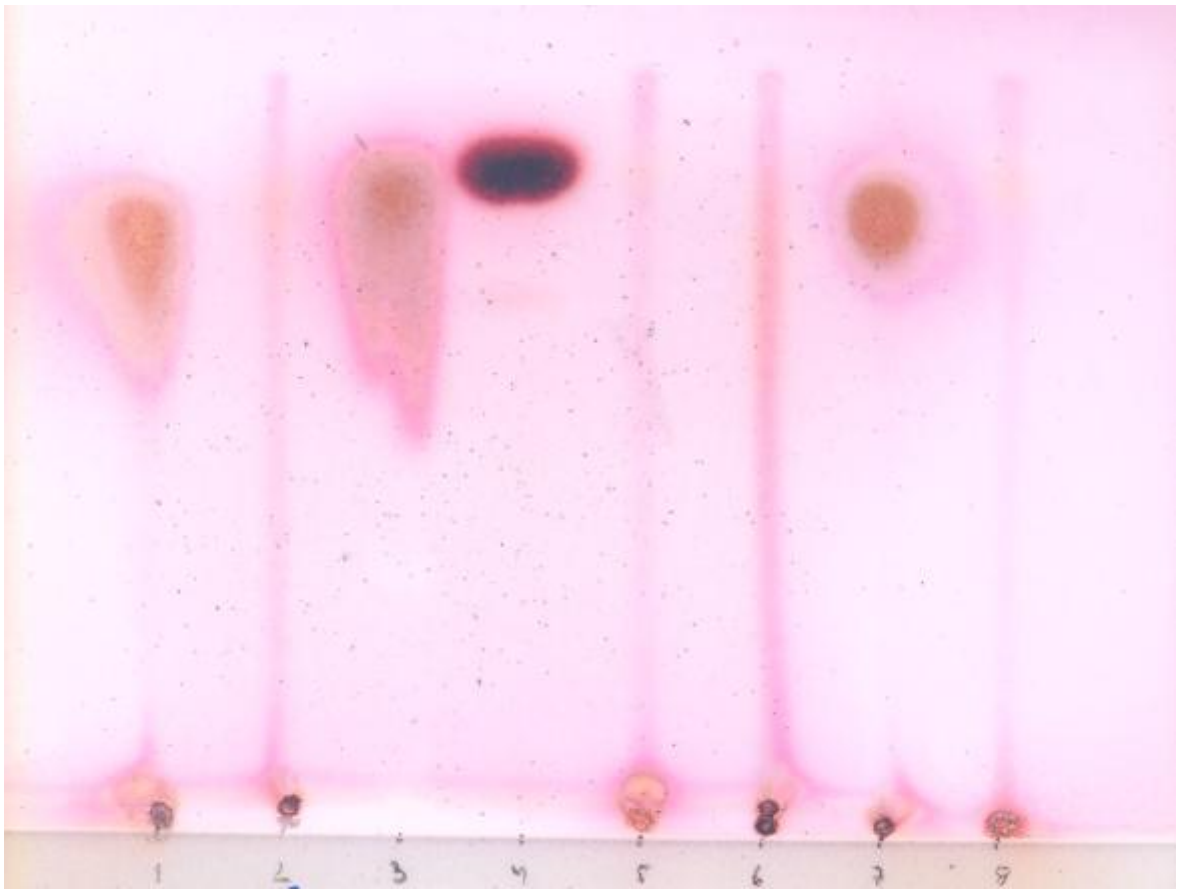
Сл.49. Последице које су изазвала нехатно активирана експлозивна средства – број погинулих, лица са тешким и лаким телесним повредама по градовима Србије у 2006.

ПРИЛОГ 2: Резултати хемијских анализа бризантних експлозива: ТНТ, Пентрита и Амонекса

2.а Анализа узорака ТНТ узетих са дна кратера танкослојном хроматографијом



2.б ТНТ и Пентрит стандард испитиван танкослојном хроматографијом



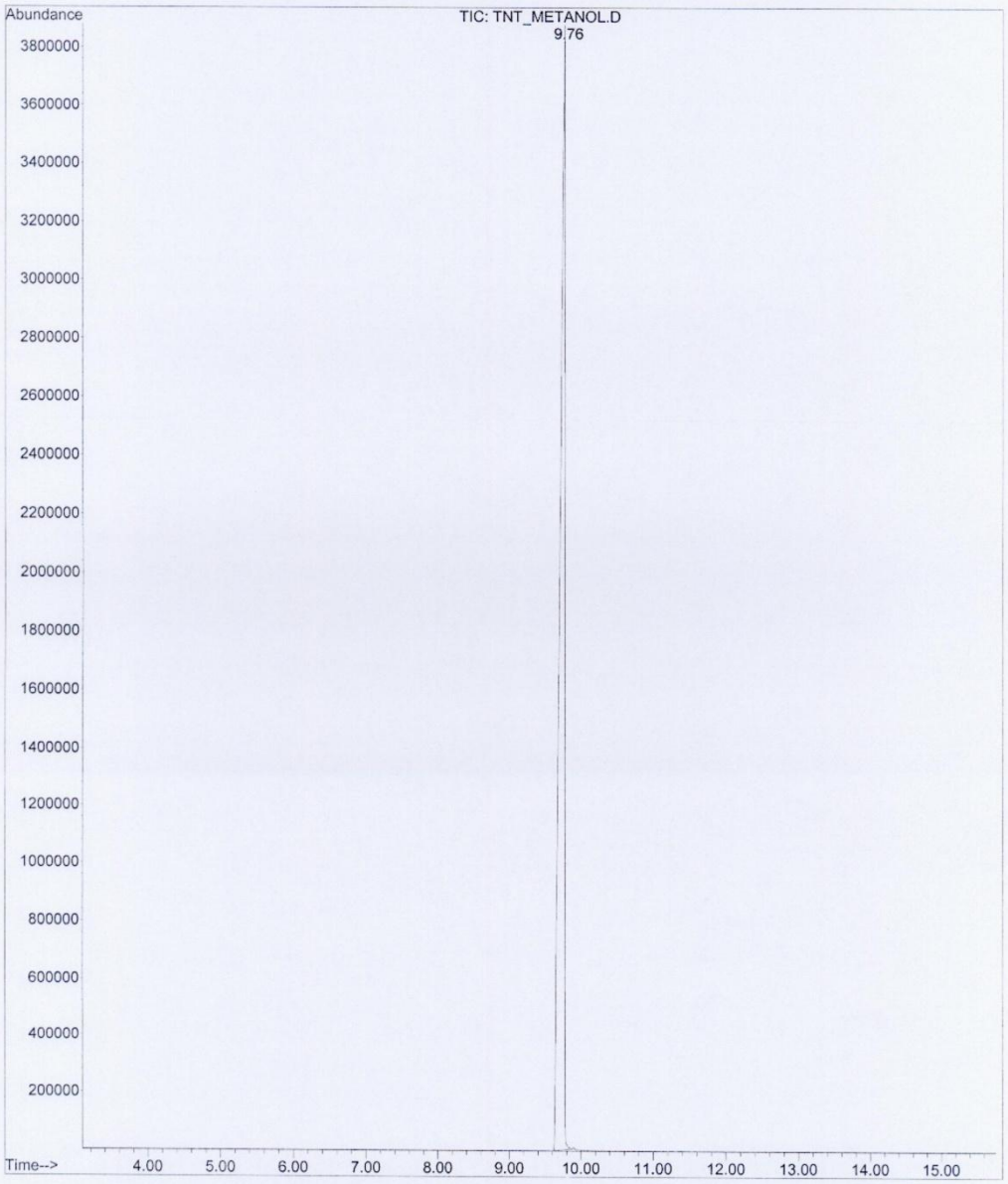
У колонама 1, 3 и 7 нанесени су стандардни узорци пентрита, а у колони 4 нанесен је стандардни узорак ТНТ.

2.в ТНТ стандард испитиван гасном хроматографијом

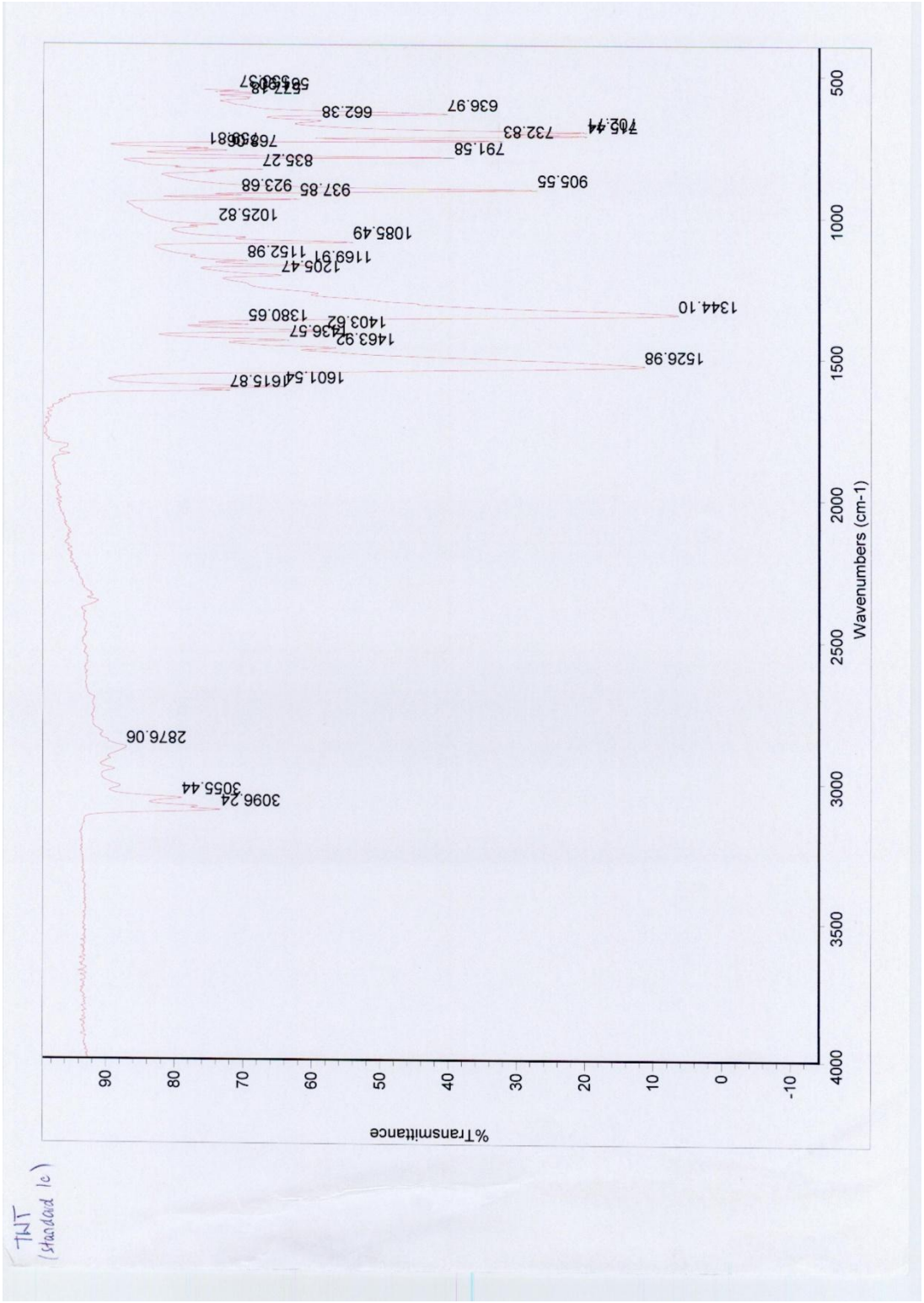
GC-MS

TNT - GAS 1

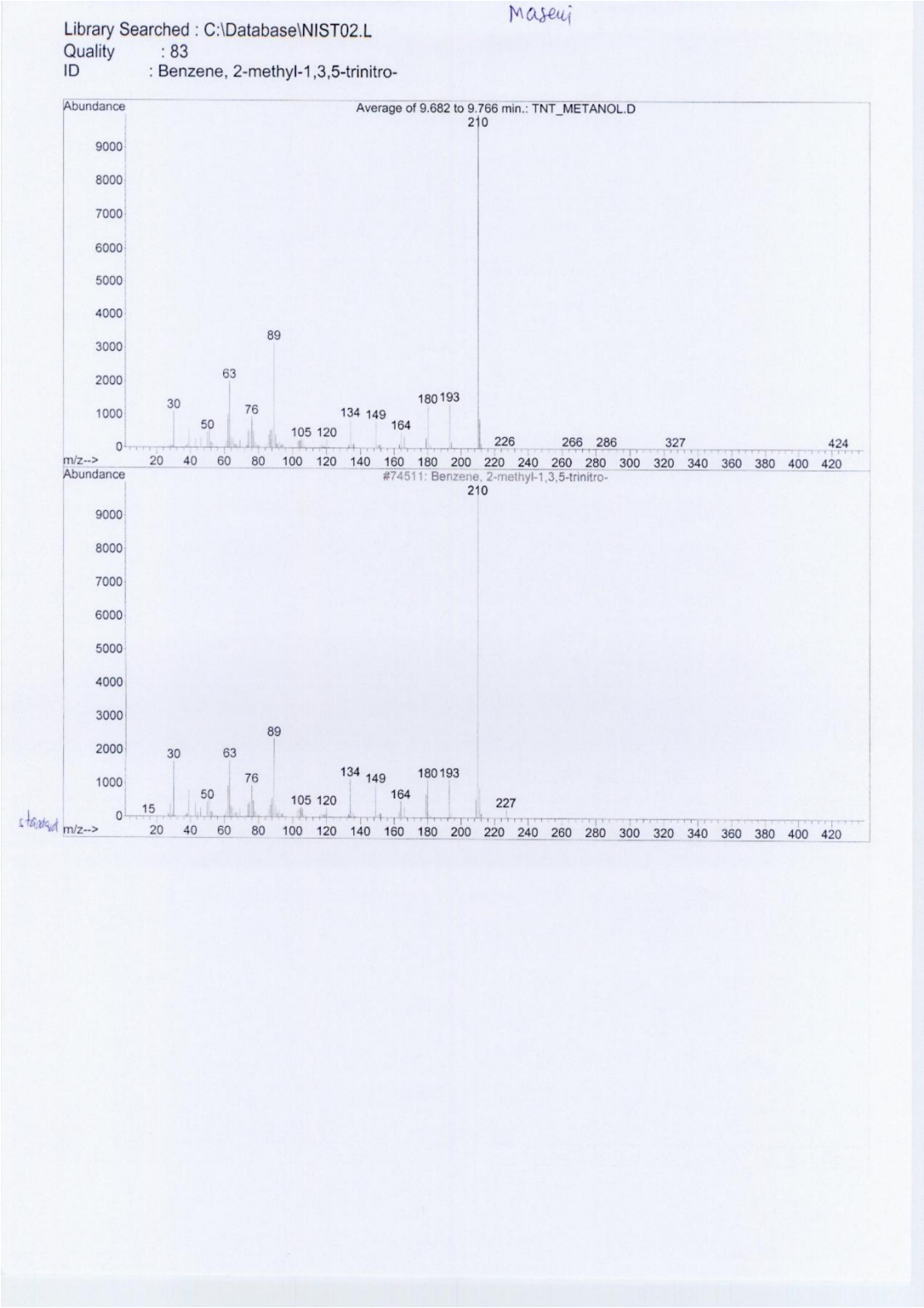
File :D:\Bekap\sa D\MSDChem\1\DATA\Eksplozivi\TNT_METANOL.D
Operator : Bojan
Acquired : 31 Jan 2007 12:31 using AcqMethod EKSPLOZIVI
Instrument : Instrumen
Sample Name:
Misc Info :
Vial Number: 1



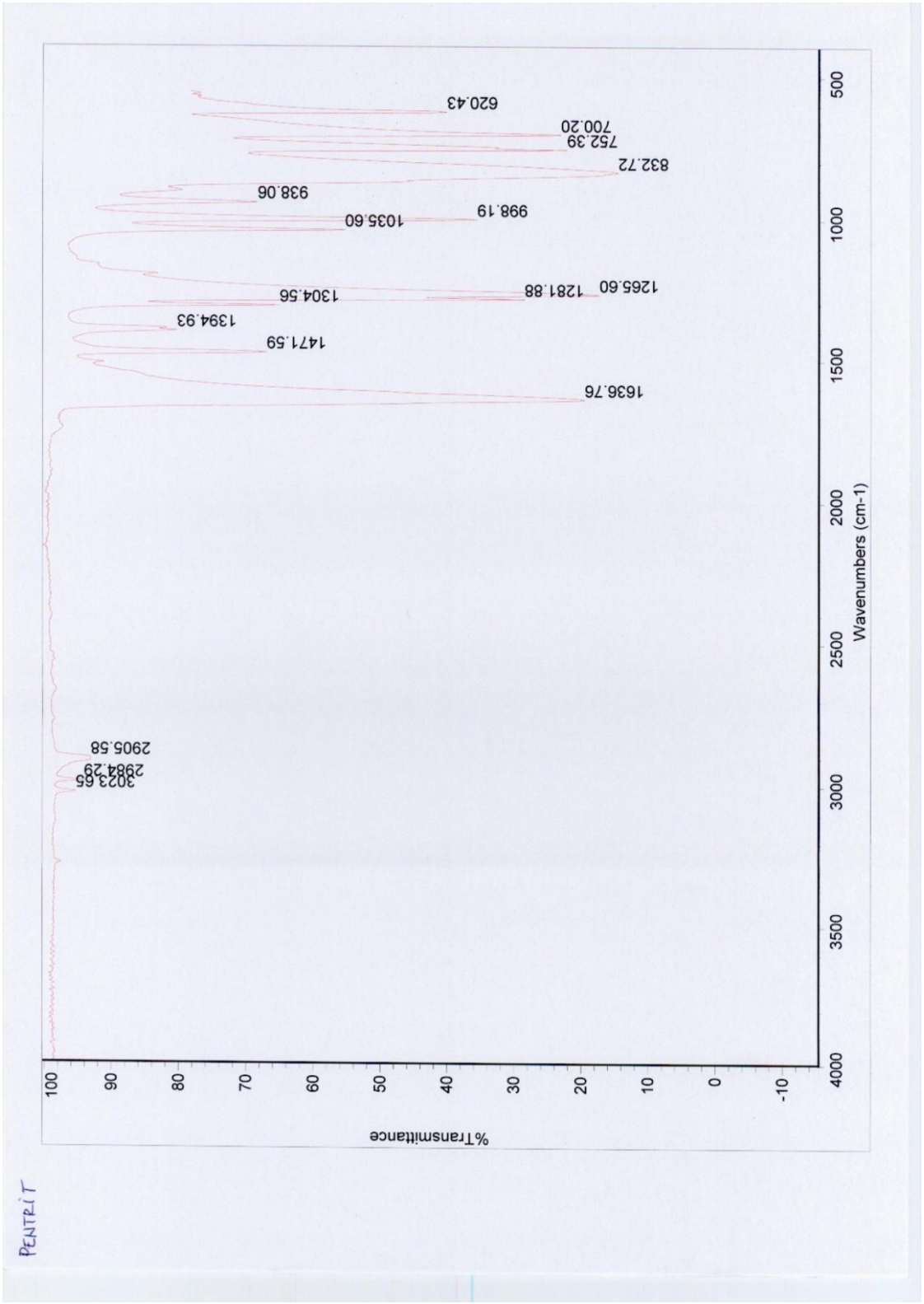
2.г ТНТ стандард испитиван инфрацрвеном спектрофотометријом



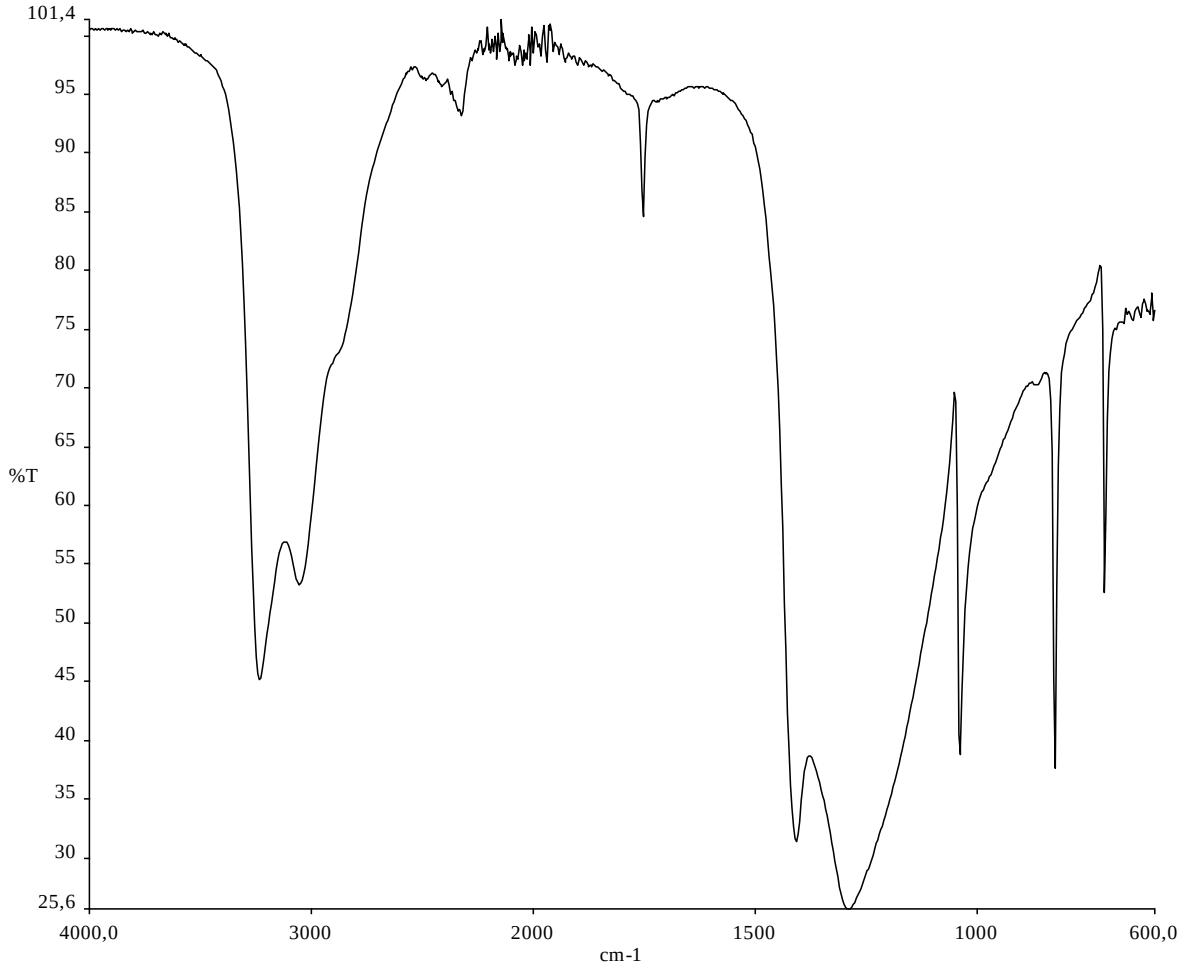
2.д Анализа узорака ТНТ узетих са дна кратера масеном спектрометријом



2.ђ Пентрит стандард испитиван инфрацрвеном спектрофотометријом



2.е Стандард амонијум нитрата испитиван инфрацрвеном спектрофотометријом



ПРИЛОГ 3: Упоредни приказ резултата запремина кратера насталих површинском експлозијом бризантних експлозива

Табела 1. Упоредни приказ резултата запремина кратера експлозијом у истим околностима (иста подлога – земља, иста врста експлозива-амонекс1 и маса експлозива) са апсолутном и релативном грешком мерења

Р. бр.	***Маса [kg]***	***димензије [m] експлозивног пуњења***	***Контактна површина P_k [m^2]***	***Димензије кратера (експерим.) [m]***	***експерим. запремина кратера V_k [m^3]***	***V_{sr}***		
1	0,1	Ф0,028x0,155	0,00364	0,18x0,15x0,04	0.000282		0,000074	0,207
2	0,1	Ф0,028x0,155	0,00364	0,19x0,16x0,035	0.000278		0,000078	0,219
3	0,1	Ф0,028x0,155	0,00364	0,22x0,2x0,04	0.000461		0,000105	0,295
4	0,1	Ф0,028x0,155	0,00364	0,2x0,14x0,055	0.000403	0,000356	0,000047	0,132
5	0,2	Ф0.032x0.250	0,008	0,4x0,3x0,1	0.003141		0,000519	0,19808
6	0,2	Ф0.032x0.250	0,008	0,38x0,23x0,09	0.002103	0,002621	0,000518	0.19763
7	0,5	Ф0.050 x0.190	0,0095	0,5x0,55x0,18	0.01178		0,00223	0,2335
8	0,5	Ф0.050 x0.190	0,0095	0,5x0,4x0,14	0.00733	0,00955	0,00222	0,3028

Табела 2. Упоредни приказ резултата запремина кратера експлозијом у истим околностима (иста подлога – земља, иста врста експлозива-ТНТ и маса експлозива) са апсолутном и релативном грешком мерења запремине

Р. бр	***Маса [kg]***	***димензије [m] експлозивног пуњења***	***Контактна површина P_k [m^2]***	***Димензије кратера (експерим.) [m]***	***Експерим запремина кратера V_k [m^3]***	***V_{sr}***		
1	0,1	Ф0.033x0.108	0,003564	0.20x0.18x0.08	0.0007536		0,00025	0,2542
2	0,1	Ф0.033x0.108	0,003564	0.22x0.22x0.10	0,001266	0,00101	0,00026	0,2534
3	0,2	0.1x0.025x0.05	0.0025	0.30x0.30x0.15	0,003532		0,00007	0,0222
4	0,2	0.1x0.05x0.025	0.0025	0.30x0.30x0.15	0,003532		0,00007	0,0222
5	0,2	0.1x0.025x0.05	0.0025	0.29x0.29x0.15	0.003302	0,00345	0,00015	0,0448

Табела 3. Упоредни приказ резултата запремина кратера експлозијом у истим околностима (иста подлога – земља, иста врста експлозива - ПЕП 500 и маса експлозива) са апсолутном и релативном грешком мерења запремине кратера

Р. бр.	***Маса [kg]***	***димензије [m] експлозивног пуњења***	***Контактна површина P_k [m^2]***	***Димензије кратера (експерим.) [m]***	***Експеримзапремина кратера V_k [m^3]***	V_{sr}		
1	0,05	0.03x0.03x0.03	0.0009	0.24x0.19x0.105	0.001253		0,000021	0,00165
2	0,05	0.03x0.03x0.03	0.0009	0.24x0.20x0.10	0.001319		0,000045	0,03543
3	0,05	0.03x0.03x0.03	0.0009	0.25x0.22x0.10	0.001439		0,0000205	0,16142
4	0,05	0.03x0.03x0.03	0.0009	0.22x0.20x0.095	0.001094		0,00018	0,14173
5	0,05	0.03x0.03x0.03	0.0009	0.22x0.20x0.11	0.001266	0,00127	0,000008	0,00629
6	0,1	Ф0.028x0.130	0,00364	0.32x0.31x0.11	0.002855		0,000038	0,01347
7	0,1	Ф0.028x0.130	0,00364	0.31x0.30x0.12	0.00292		0,000103	0,03652
8	0,1	Ф0.028x0.130	0,00364	0.30x0.31x0.11	0.002676	0,00282	0,000141	0,005

Табела 4. Упоредни приказ резултата запремина кратера експлозијом у истим околностима (иста подлога – земља са каменчићима, иста врста експлозива – ТНТ и маса експлозива) са апсолутном и релативном грешком мерења запремине кратера

Р. бр.	***Маса [kg]***	***димензије [m] експлозивног пуњења***	***Контактна површина P_k [m^2]***	***Димензије кратера (експерим.) [m]***	***Експер. запремина кратера V_k [m^3]***	V_{sr}		
1	0,1	0.1x0.025x0.025	0,0025	0,37x0,3x0,07	0,002034		0,00078	0,27718
2	0,1	0.1x0.025x0.025	0,0025	0,37x0,37x0,09	0,003225		0,00041	0,1457
3	0,1	0.1x0.025x0.025	0,0025	0,4x0,38x0,08	0,003183	0,002814	0,000369	0,13113
4	0,2	0.1x0.05x0.025	0,005	0,4x0,42x0,14	0,00615		0,000289	0,00447
5	0,2	0.1x0.05x0.025	0,005	0,4x0,4x0,16	0,006702		0,000263	0,04069
6	0,2	0.1x0.05x0.025	0,005	0,42x0,42x0,14	0,006405	0,006469	0,000026	0,00419

Табела 5. Упоредни приказ резултата запремина кратера експлозијом у истим околностима (иста подлога – бетон, иста врста експлозива – ТНТ и маса експлозива) са апсолутном и релативном грешком мерења запремине кратера

Р. бр.	***Маса [kg]***	***димензије [m] експлозивног пуњења***	***Контповршина P_k[m^2]***	***Димензије кратера (експер.) d_1 x d_2 x h [m]***	***Експер. Запрем. кратера V_k [m^3]***	V_{sr}		
1	0,2	0.100x0.050x0.025	0.005	0.25x0.23x0.04	0.0006	0,000679	0,000079	0,116347
2	0,2	0.100x0.050x0.025	0.005	0.28x0.23x0.045	0.00076		0,000079	0,116347

ПРИЛОГ 4: MATLAB Code за појединачне експлозије бризантних експлозива ТНТ, пентрита и амонекса-1 на земљи, бетону и асфалту

4.1 MATLAB Code - Случај експлозије ТНТ на земљи:

```
clear;
pack;
clc;

% gustina eksploziva za TNT:
ro_e = 1600.; % kg/m^3

% masa eksploziva za TNT:
m_e = [ 0.1  0.18 0.2 0.36 0.54 2. ]'; % kg

% gustina tla (neugažena zemlja):
ro_tla = 1500.; % kg/m^3

Pk_100 = [ (2.*16.5*108.)*1.e-06 (pi()*16.5^2)*1.e-06
((2.*16.5*108.)*1.e-06)/sqrt(2) ]';
%      pola omotaca(projekcija)      krug                nakoso 45

Pk_180 = (100.*90.)*1.e-06;
%         100x90

% kontaktna površina (kvadar dimenzija 100mm x 50mm x 25mm)):
Pk_200 = [ 0.005   0.00125  0.0025 ]';
%          100x50  50x25    100x25
% for i = 1:3
%     Pk(i) = Pk(i)^(3/2)
% end

Pk_360 = (100.*90.)*1.e-06;
%         100x90

Pk_540 = [ (100.*90.)*1.e-06  3*((100.*90.)*1.e-06) ]';
%           100x90          3 * 100x90

Pk_2000 = [ (2.*35.*300.)*1.e-06 (pi()*35.^2)*1.e-06 ]';
%        pola omotaca(projekcija)     krug

% zapremina kratera dobijena eksperimentalnim putem:
V_k = [ 7.536*1.e-04
        2.216*1.e-04
        9.396*1.e-04
        2.244*1.e-03
        3.538*1.e-03
        5.35*1.e-04
        3.532*1.e-03
        3.693*1.e-03
        4.769*1.e-03
```

```
        4.749*1.e-03
        6.411*1.e-03
        2.48*1.e-03 ];


pi_1(1) = ro_e * Pk_100(1)^(3/2) / m_e(1);
pi_1(2) = ro_e * Pk_100(2)^(3/2) / m_e(1);
pi_1(3) = ro_e * Pk_100(3)^(3/2) / m_e(1);
pi_2(1) = ro_tla * Pk_100(1)^(3/2) / m_e(1);
pi_2(2) = ro_tla * Pk_100(2)^(3/2) / m_e(1);
pi_2(3) = ro_tla * Pk_100(3)^(3/2) / m_e(1);
PI_1(1) = V_k(1) / Pk_100(1)^(3/2);
PI_1(2) = V_k(2) / Pk_100(2)^(3/2);
PI_1(3) = V_k(3) / Pk_100(3)^(3/2);

pi_1(4) = ro_e * Pk_180^(3/2) / m_e(2);
pi_2(4) = ro_tla * Pk_180^(3/2) / m_e(2);
PI_1(4) = V_k(4) / Pk_180^(3/2);

pi_1(5) = ro_e * Pk_200(1)^(3/2) / m_e(3);
pi_1(6) = ro_e * Pk_200(2)^(3/2) / m_e(3);
pi_1(7) = ro_e * Pk_200(3)^(3/2) / m_e(3);
pi_2(5) = ro_tla * Pk_200(1)^(3/2) / m_e(3);
pi_2(6) = ro_tla * Pk_200(2)^(3/2) / m_e(3);
pi_2(7) = ro_tla * Pk_200(3)^(3/2) / m_e(3);
PI_1(5) = V_k(5) / Pk_200(1)^(3/2);
PI_1(6) = V_k(6) / Pk_200(2)^(3/2);
PI_1(7) = V_k(7) / Pk_200(3)^(3/2);

pi_1(8) = ro_e * Pk_360^(3/2) / m_e(4);
pi_2(8) = ro_tla * Pk_360^(3/2) / m_e(4);
PI_1(8) = V_k(8) / Pk_360^(3/2);

pi_1(9) = ro_e * Pk_540(1)^(3/2) / m_e(5);
pi_1(10) = ro_e * Pk_540(2)^(3/2) / m_e(5);
pi_2(9) = ro_tla * Pk_540(1)^(3/2) / m_e(5);
pi_2(10) = ro_tla * Pk_540(2)^(3/2) / m_e(5);
PI_1(9) = V_k(9) / Pk_540(1)^(3/2);
PI_1(10) = V_k(10) / Pk_540(2)^(3/2);

pi_1(11) = ro_e * Pk_2000(1)^(3/2) / m_e(6);
pi_1(12) = ro_e * Pk_2000(2)^(3/2) / m_e(6);
pi_2(11) = ro_tla * Pk_2000(1)^(3/2) / m_e(6);
pi_2(12) = ro_tla * Pk_2000(2)^(3/2) / m_e(6);
PI_1(11) = V_k(11) / Pk_2000(1)^(3/2);
PI_1(12) = V_k(12) / Pk_2000(2)^(3/2);

[X,Y] = meshgrid(pi_1, pi_2);
tnt_vol = zeros(size(12,1), size(12,1));
for k = 1:12
    tnt_vol(k,k) = PI_1(k);
end
Z = tnt_vol;

figure(1)
surf(X,Y,Z);
```

```
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('TNT linear');

% Determine the minimum and the maximum x and y values:
xmin = min(pi_1);
xmax = max(pi_1);
ymin = min(pi_2);
ymax = max(pi_2);

% Define the resolution of the grid:
xres = 800;
yres = 800;

% Define the range and spacing of the x- and y- cooridnates,
% and then fit into X and Y:
xv = linspace(xmin,xmax,xres);
yv = linspace(ymin,ymax,yres);
[Xinterp,Yinterp] = meshgrid(xv,yv);

z = V_k;

% Calculate Z in the X-Y interpolation space, which is an
% evenly space grid:
Zinterp = griddata(pi_1,pi_2,Z,Xinterp,Yinterp,'cubic',{'Pp','QJ'});

for k = 1:12
    V_cubic(k) = griddata(pi_2,pi_2,Z,pi_1(k),pi_2(k),'cubic');
    resid_cubic(k) = V_cubic(k) - Z(k);
end

figure(2)
mesh(Xinterp,Yinterp,Zinterp)
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('TNT cubic');

hold on
plot3(pi_1,pi_2,Z,'marker',
'o','markerfacecolor','r','linestyle','none')
```

4.2 MATLAB Code - Случај експлозије пентрита на земљи:

```
clear;
pack;
clc;

% gustina eksploziva za pentrit:
ro_e = 1760.; % kg/m^3

% masa eksploziva za pentrit:
m_e = [ 0.05  0.1 0.2 0.25 0.5 1. ]'; % kg

% gustina tla (neugažena zemlja):
ro_tla = 1500.; % kg/m^3

Pk_50 = 9*1.e-04;
% kockica

Pk_100 = [ (2.*14.*130.)*1.e-06 (2.*10.*125.)*1.e-06 ]' ;
%         1/2 omotaca(projekcija) 1/2 omotaca(projekcija)

Pk_200 = [ (2.*14.*130.)*1.e-06 (4.*14.*130.)*1.e-06 ]';
%          1/2 omotaca(projekcija) 1/2 od 2 omotaca(projekcija)

% kontaktna površina (kvadar dimenzija 80mm x 60mm x 30mm)):
Pk_250 = [ 80.*60.*1.e-6   60.*30.*1.e-6 ]';

% kontaktna površina (kvadar dimenzija 80mm x 60mm x 60mm)):
Pk_500 = 80.*60.*1.e-6;

% kontaktna površina (kvadar dimenzija 80mm x 60mm x 120mm)):
Pk_1000 = 80.*60.*1.e-6;


% zapremina kratera dobijena eksperimentalnim putem:
V_k = [ 1.2566*1.e-03
        2.8568*1.e-03
        3.2070*1.e-03
        6.8068*1.e-03
        7.1209*1.e-03
        8.5085*1.e-03
        2.9322*1.e-02
        1.0295*1.e-02
        1.9242*1.e-02 ];


pi_1(1) = ro_e * Pk_50^(3/2) / m_e(1);
pi_2(1) = ro_tla * Pk_50^(3/2) / m_e(1);
PI_1(1) = V_k(1) / Pk_50^(3/2);

pi_1(2) = ro_e * Pk_100(1)^(3/2) / m_e(2);
pi_1(3) = ro_e * Pk_100(2)^(3/2) / m_e(2);
pi_2(2) = ro_tla * Pk_100(1)^(3/2) / m_e(2);
pi_2(3) = ro_tla * Pk_100(2)^(3/2) / m_e(2);
```

```
PI_1(2) = V_k(2) / Pk_100(1)^(3/2);
PI_1(3) = V_k(3) / Pk_100(2)^(3/2);

pi_1(4) = ro_e * Pk_200(1)^(3/2) / m_e(3);
pi_1(5) = ro_e * Pk_200(2)^(3/2) / m_e(3);
pi_2(4) = ro_tla * Pk_200(1)^(3/2) / m_e(3);
pi_2(5) = ro_tla * Pk_200(2)^(3/2) / m_e(3);
PI_1(4) = V_k(4) / Pk_200(1)^(3/2);
PI_1(5) = V_k(5) / Pk_200(2)^(3/2);

pi_1(6) = ro_e * Pk_250(1)^(3/2) / m_e(4);
pi_1(7) = ro_e * Pk_250(2)^(3/2) / m_e(4);
pi_2(6) = ro_tla * Pk_250(1)^(3/2) / m_e(4);
pi_2(7) = ro_tla * Pk_250(2)^(3/2) / m_e(4);
PI_1(6) = V_k(6) / Pk_250(1)^(3/2);
PI_1(7) = V_k(7) / Pk_250(2)^(3/2);

pi_1(8) = ro_e * Pk_500^(3/2) / m_e(5);
pi_2(8) = ro_tla * Pk_500^(3/2) / m_e(5);
PI_1(8) = V_k(8) / Pk_500^(3/2);

pi_1(9) = ro_e * Pk_1000^(3/2) / m_e(6);
pi_2(9) = ro_tla * Pk_1000^(3/2) / m_e(6);
PI_1(9) = V_k(9) / Pk_1000^(3/2);



[X,Y] = meshgrid(pi_1, pi_2);
pep_vol = zeros(size(9,1), size(9,1));
for k = 1:9
    pep_vol(k,k) = PI_1(k);
end
Z = pep_vol;

figure(1)
surf(X,Y,Z);
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('PEP linear');

% Determine the minimum and the maximum x and y values:
xmin = min(pi_1);
xmax = max(pi_1);
ymin = min(pi_2);
ymax = max(pi_2);

% Define the resolution of the grid:
xres = 800;
yres = 800;

% Define the range and spacing of the x- and y- cooridnates,
% and then fit into X and Y:
xv = linspace(xmin,xmax,xres);
yv = linspace(ymin,ymax,yres);
```

```
[Xinterp,Yinterp] = meshgrid(xv,yv);

z = V_k;

% Calculate Z in the X-Y interpolation space, which is an
% evenly space grid:
Zinterp = griddata(pi_1,pi_2,Z,Xinterp,Yinterp,'cubic',{'Pp','QJ'});

for k = 1:9
    V_cubic(k) = griddata(pi_2,pi_2,Z,pi_1(k),pi_2(k),'cubic');
    resid_cubic(k) = V_cubic(k) - Z(k);
end

figure(2)
mesh(Xinterp,Yinterp,Zinterp)
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('PEP cubic');
hold on
plot3(pi_1,pi_2,Z,'marker',
'o','markerfacecolor','r','linestyle','none')
```

4.3 MATLAB Code - Случај експлозије Амонекс1 на земљи:

```
clear;
pack;
clc;

% gustina eksploziva za Amonex1:
ro_e = 1060; % kg/m^3

% masa eksploziva za Amonex1:
% m_e = [ 0.05  0.1  0.2 0.25 0.5 1. ]'; % kg
m_e = [ 0.09  0.1  0.2  0.25  0.5  1.  1.5  2.0  9.0 ]'; % kg

% gustina tla (neugažena zemlja):
ro_tla = 1500.; % kg/m^3

Pk_90 = (2.*14.*130.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca(projekcija)

Pk_100 = (2.*14.*155.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca(projekcija)

Pk_200_1 = (2.*16.*250.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca(projekcija)

Pk_200_2 = (2.*28.*155.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca(projekcija)

Pk_200_3 = Pk_200_2;
%       1/2 omotaca(projekcija)

Pk_250 = (2.*30.*100.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca(projekcija)

Pk_500 = (2.*25.*190.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca(projekcija)

Pk_1000_1 = (2.*30.*250.)*1.e-06;
%          pola omota?a

Pk_1000_2 = pi()*(35.*300.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca(projekcija)

Pk_1500 = (2.*35.*450.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca(projekcija)

Pk_2000 = (2.*70.*300.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca(projekcija)

Pk_9000 = (2.*6.*35.*450.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca(projekcija)


% zapremina kratera dobijena eksperimentalnim putem:
```

```
V_k = [ 0.16*0.12*0.035*pi()/12.                % 90
        0.19*0.16*0.035*pi()/12.                % 100
        0.40*0.18*0.060*pi()/12.                % 200
        0.40*0.30*0.100*pi()/12.                % 200
        0.33*0.30*0.120*pi()/12.                % 200
        0.38*0.35*0.120*pi()/12.                % 250
        0.50*0.55*0.180*pi()/12.                % 500
        0.60*0.55*0.150*pi()/12.                % 1000
        0.40*0.30*0.180*pi()/12.                % 1000
        0.50*0.34*0.220*pi()/12.                % 1500
        1.00*0.90*0.180*pi()/12.                % 2000
        2.40*0.90*0.100*pi()/12. ];             % 9000

%90
pi_1(1) = ro_e * Pk_90^(3/2) / m_e(1);
pi_2(1) = ro_tla * Pk_90^(3/2) / m_e(1);
PI_1(1) = V_k(1) / Pk_90^(3/2);

%100
pi_1(2) = ro_e * Pk_100^(3/2) / m_e(2);
pi_2(2) = ro_tla * Pk_100^(3/2) / m_e(2);
PI_1(2) = V_k(2) / Pk_100^(3/2);

%200
pi_1(3) = ro_e * Pk_200_1^(3/2) / m_e(3);
pi_1(4) = ro_e * Pk_200_2^(3/2) / m_e(3);
pi_1(5) = ro_e * Pk_200_3^(3/2) / m_e(3);
pi_2(3) = ro_tla * Pk_200_1^(3/2) / m_e(3);
pi_2(4) = ro_tla * Pk_200_2^(3/2) / m_e(3);
pi_2(5) = ro_tla * Pk_200_3^(3/2) / m_e(3);
PI_1(3) = V_k(3) / Pk_200_1^(3/2);
PI_1(4) = V_k(4) / Pk_200_2^(3/2);
PI_1(5) = V_k(5) / Pk_200_3^(3/2);

%250
pi_1(6) = ro_e * Pk_250^(3/2) / m_e(4);
pi_2(6) = ro_tla * Pk_250^(3/2) / m_e(4);
PI_1(6) = V_k(6) / Pk_250^(3/2);

%500
pi_1(7) = ro_e * Pk_500^(3/2) / m_e(5);
pi_2(7) = ro_tla * Pk_500^(3/2) / m_e(5);
PI_1(7) = V_k(7) / Pk_500^(3/2);

%1000
pi_1(8) = ro_e * Pk_1000_1^(3/2) / m_e(6);
pi_1(9) = ro_e * Pk_1000_2^(3/2) / m_e(6);
pi_2(8) = ro_tla * Pk_1000_1^(3/2) / m_e(6);
pi_2(9) = ro_tla * Pk_1000_2^(3/2) / m_e(6);
PI_1(8) = V_k(8) / Pk_1000_1^(3/2);
PI_1(9) = V_k(9) / Pk_1000_2^(3/2);

%1500
pi_1(10) = ro_e * Pk_1500^(3/2) / m_e(7);
pi_2(10) = ro_tla * Pk_1500^(3/2) / m_e(7);
PI_1(10) = V_k(10) / Pk_1500^(3/2);
```

```
%2000
pi_1(11) = ro_e * Pk_2000^(3/2) / m_e(8);
pi_2(11) = ro_tla * Pk_2000^(3/2) / m_e(8);
PI_1(11) = V_k(11) / Pk_2000^(3/2);

%9000
pi_1(12) = ro_e * Pk_9000^(3/2) / m_e(9);
pi_2(12) = ro_tla * Pk_9000^(3/2) / m_e(9);
PI_1(12) = V_k(12) / Pk_9000^(3/2);



[X,Y] = meshgrid(pi_1, pi_2);
amonex1_vol = zeros(size(12,1), size(12,1));
for k = 1:12
    amonex1_vol(k,k) = PI_1(k);
end
Z = amonex1_vol;

figure(1)
surf(X,Y,Z);
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('AMONEX1 linear');

% Determine the minimum and the maximum x and y values:
xmin = min(pi_1);
xmax = max(pi_1);
ymin = min(pi_2);
ymax = max(pi_2);

% Define the resolution of the grid:
xres = 800;
yres = 800;

% Define the range and spacing of the x- and y- cooridnates,
% and then fit into X and Y:
xv = linspace(xmin,xmax,xres);
yv = linspace(ymin,ymax,yres);
[Xinterp,Yinterp] = meshgrid(xv,yv);

%:
z = V_k;

% Calculate Z in the X-Y interpolation space, which is an
% evenly space grid:
Zinterp = griddata(pi_1,pi_2,Z,Xinterp,Yinterp,'cubic',{'Pp','QJ'});

for k = 1:12
    V_cubic(k) = griddata(pi_2,pi_2,Z,pi_1(k),pi_2(k),'cubic');
    resid_cubic(k) = V_cubic(k) - Z(k);
end

figure(2)
```

```
mesh(Xinterp,Yinterp,Zinterp)
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('AMONEX1 cubic');
hold on
plot3(pi_1,pi_2,Z,'marker',
'o','markerfacecolor','r','linestyle','none')
```

4.4 MATLAB Code - Случај експлозије ТНТ на бетону:

```
clear;
pack;
clc;

% gustina eksploziva za TNT:
ro_e = 1600.; % kg/m^3

% masa eksploziva za TNT:
m_e = [ 0.1  0.15 0.2 0.4 ]'; % kg

% gustina tla (beton):
ro_tla = 1600.; % kg/m^3


Pk_100 = (2.*16.5*108.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca (projekcija)

Pk_150 = (2.*16.5*162.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca (projekcija)

% kontaktna površina (kvadar dimenzija 100mm x 50mm x 25mm)):
Pk_200 = 100.*50.*1.e-06;

Pk_400 = Pk_200;

% zapremina kratera dobijena eksperimentalnim putem:
V_k = [ (180.*120.*30.*pi()/12.)*1.e-09
        (180.*170.*30.*pi()/12.)*1.e-09
        (250.*230.*40.*pi()/12.)*1.e-09
        (290.*220.*45.*pi()/12.)*1.e-09 ];

pi_1(1) = ro_e * Pk_100^(3/2) / m_e(1);
pi_2(1) = ro_tla * Pk_100^(3/2) / m_e(1);
PI_1(1) = V_k(1) / Pk_100^(3/2);

pi_1(2) = ro_e * Pk_150^(3/2) / m_e(2);
pi_2(2) = ro_tla * Pk_150^(3/2) / m_e(2);
PI_1(2) = V_k(2) / Pk_150^(3/2);

pi_1(3) = ro_e * Pk_200^(3/2) / m_e(3);
pi_2(3) = ro_tla * Pk_200^(3/2) / m_e(3);
PI_1(3) = V_k(3) / Pk_200^(3/2);

pi_1(4) = ro_e * Pk_400^(3/2) / m_e(4);
pi_2(4) = ro_tla * Pk_400^(3/2) / m_e(4);
PI_1(4) = V_k(4) / Pk_400^(3/2);

[X,Y] = meshgrid(pi_1, pi_2);
tnt_vol = zeros(size(4,1), size(4,1));
for k = 1:4
    tnt_vol(k,k) = PI_1(k);
end
```

```
Z = tnt_vol

figure(1)
surf(X,Y,Z);
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('TNT linear');

% Determine the minimum and the maximum x and y values:
xmin = min(pi_1);
xmax = max(pi_1);
ymin = min(pi_2);
ymax = max(pi_2);

% Define the resolution of the grid:
xres = 800;
yres = 800;

% Define the range and spacing of the x- and y- cooridnates,
% and then fit into X and Y:
xv = linspace(xmin,xmax,xres);
yv = linspace(ymin,ymax,yres);
[Xinterp,Yinterp] = meshgrid(xv,yv);

z = V_k;

% Calculate Z in the X-Y interpolation space, which is an
% evenly space grid:
Zinterp = griddata(pi_1,pi_2,Z,Xinterp,Yinterp,'cubic',{'Pp','QJ'});

for k = 1:4
    V_cubic(k) = griddata(pi_2,pi_2,Z,pi_1(k),pi_2(k),'cubic');
    resid_cubic(k) = V_cubic(k) - Z(k);
end

figure(2)
mesh(Xinterp,Yinterp,Zinterp)
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('TNT cubic');
hold on
plot3(pi_1,pi_2,Z,'marker',
'o','markerfacecolor','r','linestyle','none')
```

4.5 MATLAB Code - Случај експлозије пентрита на бетону:

```
clear;
pack;
clc;

% gustina eksploziva za pentrit:
ro_e = 1760.; % kg/m^3

% masa eksploziva za pentrit:
m_e = [ 0.1  0.2 0.25 ]'; % kg


% gustina tla (beton):
ro_tla = 1600.; % kg/m^3

Pk_100 = (2.*10.*140.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca (projekcija)

Pk_200 = Pk_100;
%       1/2 omotaca (projekcija)

% kontaktna površina (kvadar dimenzija 80mm x 35mm x 25mm)):
Pk_250 = 80.*35.*1.e-6;

% zapremina kratera dobijena eksperimentalnim putem:
V_k = [ (240.*200.*40.*pi())/12.*1.e-09
        (300.*270.*60.*pi())/12.*1.e-09
        (320.*280.*55.*pi())/12.*1.e-09 ];


pi_1(1) = ro_e * Pk_100^(3/2) / m_e(1);
pi_2(1) = ro_tla * Pk_100^(3/2) / m_e(1);
PI_1(1) = V_k(1) / Pk_100^(3/2);

pi_1(2) = ro_e * Pk_200^(3/2) / m_e(2);
pi_2(2) = ro_tla * Pk_200^(3/2) / m_e(2);
PI_1(2) = V_k(2) / Pk_200^(3/2);

pi_1(3) = ro_e * Pk_250^(3/2) / m_e(3);
pi_2(3) = ro_tla * Pk_250^(3/2) / m_e(3);
PI_1(3) = V_k(3) / Pk_250^(3/2);


[X,Y] = meshgrid(pi_1, pi_2);
pep_vol = zeros(size(3,1), size(3,1));
for k = 1:3
    pep_vol(k,k) = PI_1(k);
end
Z = pep_vol;

figure(1)
surf(X,Y,Z);
xlabel('\pi_1');
```

```
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('PEP linear');


% Determine the minimum and the maximum x and y values:
xmin = min(pi_1);
xmax = max(pi_1);
ymin = min(pi_2);
ymax = max(pi_2);

% Define the resolution of the grid:
xres = 800;
yres = 800;

% Define the range and spacing of the x- and y- cooridnates,
% and then fit into X and Y:
xv = linspace(xmin,xmax,xres);
yv = linspace(ymin,ymax,yres);
[Xinterp,Yinterp] = meshgrid(xv,yv);

%:
z = V_k;

% Calculate Z in the X-Y interpolation space, which is an
% evenly space grid:
Zinterp = griddata(pi_1,pi_2,Z,Xinterp,Yinterp,'cubic',{'Pp','QJ'});

for k = 1:3
    V_cubic(k) = griddata(pi_2,pi_2,Z,pi_1(k),pi_2(k),'cubic');
    resid_cubic(k) = V_cubic(k) - Z(k);
end

figure(2)
mesh(Xinterp,Yinterp,Zinterp)
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('PEP cubic');
hold on
plot3(pi_1,pi_2,Z,'marker',
'o','markerfacecolor','r','linestyle','none')
```

4.6 MATLAB Code - Случај експлозије Амонекс1 на бетону:

```
clear;
pack;
clc;

% gustina eksploziva za Amonex1:
ro_e = 1060.; % kg/m^3

% masa eksploziva za Amonex1:
m_e = [ 0.1  0.2  0.5 ]'; % kg

% gustina tla (beton):
ro_tla = 1600.; % kg/m^3

Pk_100 = (2.*14.*155.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca (projekcija)

Pk_200 = 2.*Pk_100;
%       1/2 omotaca (projekcija)

Pk_500 = (2.*30.*130.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca (projekcija)

% zapremina kratera dobijena eksperimentalnim putem:
V_k = [ (0.17*0.04*0.015*pi())/12.
        (0.19*0.08*0.06*pi())/12.
        (0.30*0.27*0.07*pi())/12. ];

pi_1(1) = ro_e * Pk_100^(3/2) / m_e(1);
pi_2(1) = ro_tla * Pk_100^(3/2) / m_e(1);
PI_1(1) = V_k(1) / Pk_100^(3/2);

pi_1(2) = ro_e * Pk_200^(3/2) / m_e(2);
pi_2(2) = ro_tla * Pk_200^(3/2) / m_e(2);
PI_1(2) = V_k(2) / Pk_200^(3/2);

pi_1(3) = ro_e * Pk_500^(3/2) / m_e(3);
pi_2(3) = ro_tla * Pk_500^(3/2) / m_e(3);
PI_1(3) = V_k(3) / Pk_500^(3/2);

[X,Y] = meshgrid(pi_1, pi_2);
amonex1_vol = zeros(size(3,1), size(3,1));
for k = 1:3
    amonex1_vol(k,k) = PI_1(k);
end
Z = amonex1_vol;

figure(1)
surf(X,Y,Z);
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('AMONEX1 linear');
```

```
% Determine the minimum and the maximum x and y values:
xmin = min(pi_1);
xmax = max(pi_1);
ymin = min(pi_2);
ymax = max(pi_2);

% Define the resolution of the grid:
xres = 800;
yres = 800;

% Define the range and spacing of the x- and y- cooridnates,
% and then fit into X and Y:
xv = linspace(xmin,xmax,xres);
yv = linspace(ymin,ymax,yres);
[Xinterp,Yinterp] = meshgrid(xv,yv);

%:
z = V_k;

% Calculate Z in the X-Y interpolation space, which is an
% evenly space grid:
Zinterp = griddata(pi_1,pi_2,Z,Xinterp,Yinterp,'cubic',{'Pp','QJ'});

for k = 1:3
    V_cubic(k) = griddata(pi_2,pi_2,Z,pi_1(k),pi_2(k),'cubic');
    resid_cubic(k) = V_cubic(k) - Z(k);
end

figure(2)
mesh(Xinterp,Yinterp,Zinterp)
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('AMONEX1 cubic');
hold on
plot3(pi_1,pi_2,Z,'marker',
'o','markerfacecolor','r','linestyle','none')
```

4.7 MATLAB Code - Случај експлозије ТНТ на асфалту:

```
clear;
pack;
clc;

% gustina eksploziva za TNT:
ro_e = 1600.; % kg/m^3

% masa eksploziva za TNT:
m_e = [ 0.1 0.2 0.4 ]'; % kg

% gustina tla (asfalt):
ro_tla = 2000.; % kg/m^3

Pk_100 = (2.*16.5*108.)*1.e-06;
%        1/2 omotaca (projekcija)

% kontaktna površina (kvadar dimenzija 100mm x 50mm x 25mm)):
Pk_200 = 100.*50.*1.e-06;

Pk_400 = Pk_200;

% zapremina kratera dobijena eksperimentalnim putem:
V_k = [ (140.*130.*20.*pi()/12.)*1.e-09
        (260.*200.*55.*pi()/12.)*1.e-09
        (250.*210.*55.*pi()/12.)*1.e-09 ];

pi_1(1) = ro_e * Pk_100^(3/2) / m_e(1);
pi_2(1) = ro_tla * Pk_100^(3/2) / m_e(1);
PI_1(1) = V_k(1) / Pk_100^(3/2);

pi_1(2) = ro_e * Pk_200^(3/2) / m_e(2);
pi_2(2) = ro_tla * Pk_200^(3/2) / m_e(2);
PI_1(2) = V_k(2) / Pk_200^(3/2);

pi_1(3) = ro_e * Pk_400^(3/2) / m_e(3);
pi_2(3) = ro_tla * Pk_400^(3/2) / m_e(3);
PI_1(3) = V_k(3) / Pk_400^(3/2);

[X,Y] = meshgrid(pi_1, pi_2);
tnt_vol = zeros(size(3,1), size(3,1));
for k = 1:3
    tnt_vol(k,k) = PI_1(k);
end
Z = tnt_vol

figure(1)
surf(X,Y,Z);
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('TNT linear');
```

```
% Determine the minimum and the maximum x and y values:
xmin = min(pi_1);
xmax = max(pi_1);
ymin = min(pi_2);
ymax = max(pi_2);

% Define the resolution of the grid:
xres = 800;
yres = 800;

% Define the range and spacing of the x- and y- cooridnates,
% and then fit into X and Y:
xv = linspace(xmin,xmax,xres);
yv = linspace(ymin,ymax,yres);
[Xinterp,Yinterp] = meshgrid(xv,yv);

%:
z = V_k;

% Calculate Z in the X-Y interpolation space, which is an
% evenly space grid:
Zinterp = griddata(pi_1,pi_2,Z,Xinterp,Yinterp,'cubic',{'Pp','QJ'});

for k = 1:3
    V_cubic(k) = griddata(pi_2,pi_2,Z,pi_1(k),pi_2(k),'cubic');
    resid_cubic(k) = V_cubic(k) - Z(k);
end

figure(2)
mesh(Xinterp,Yinterp,Zinterp)
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('TNT cubic');
hold on
plot3(pi_1,pi_2,Z,'marker',
'o','markerfacecolor','r','linestyle','none')
```

4.8 MATLAB Code - Случај експлозије пентрита на асфалту:

```
clear;
pack;
clc;

% gustina eksploziva za pentrit:
ro_e = 1760.; % kg/m^3

% masa eksploziva za pentrit:
m_e = [ 0.1  0.25  0.5 ]'; % kg


% gustina tla (asfalt):
ro_tla = 2000.; % kg/m^3

Pk_100 = (2.*10.*140.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca (projekcija)

% kontaktna površina (kvadar dimenzija 80mm x 35mm x 25mm)):
Pk_250 = 80.*35.*1.e-6;

% kontaktna površina (kvadar dimenzija 150mm x 60mm x 40mm)):
Pk_500 = 150.*60.*1.e-6;


% zapremina kratera dobijena eksperimentalnim putem:
V_k = [ (210.*200.*34.*pi())/12.*1.e-09
        (400.*300.*70.*pi())/12.*1.e-09
        (380.*380.*90.*pi())/12.*1.e-09  ];


pi_1(1) = ro_e * Pk_100^(3/2) / m_e(1);
pi_2(1) = ro_tla * Pk_100^(3/2) / m_e(1);
PI_1(1) = V_k(1) / Pk_100^(3/2);

pi_1(2) = ro_e * Pk_250^(3/2) / m_e(2);
pi_2(2) = ro_tla * Pk_250^(3/2) / m_e(2);
PI_1(2) = V_k(2) / Pk_250^(3/2);

pi_1(3) = ro_e * Pk_500^(3/2) / m_e(3);
pi_2(3) = ro_tla * Pk_500^(3/2) / m_e(3);
PI_1(3) = V_k(3) / Pk_500^(3/2);

[X,Y] = meshgrid(pi_1, pi_2);
pep_vol = zeros(size(3,1), size(3,1));
for k = 1:3
    pep_vol(k,k) = PI_1(k);
end
Z = pep_vol;

figure(1)
surf(X,Y,Z);
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
```

```
title('PEP linear');

% Determine the minimum and the maximum x and y values:
xmin = min(pi_1);
xmax = max(pi_1);
ymin = min(pi_2);
ymax = max(pi_2);

% Define the resolution of the grid:
xres = 800;
yres = 800;

% Define the range and spacing of the x- and y- cooridnates,
% and then fit into X and Y:
xv = linspace(xmin,xmax,xres);
yv = linspace(ymin,ymax,yres);
[Xinterp,Yinterp] = meshgrid(xv,yv);

%:
z = V_k;

% Calculate Z in the X-Y interpolation space, which is an
% evenly space grid:
Zinterp = griddata(pi_1,pi_2,Z,Xinterp,Yinterp,'cubic',{'Pp','QJ'});

for k = 1:3
    V_cubic(k) = griddata(pi_2,pi_2,Z,pi_1(k),pi_2(k),'cubic');
    resid_cubic(k) = V_cubic(k) - Z(k);
end

figure(2)
mesh(Xinterp,Yinterp,Zinterp)
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('PEP cubic');
hold on
plot3(pi_1,pi_2,Z,'marker', 'o','markerfacecolor','r','linestyle','none')
```

4.9 MATLAB Code - Случај експлозије Амонекс1 на асфалту:

```
clear;
pack;
clc;

% gustina eksploziva za Amonex1:
ro_e = 1060.; % kg/m^3

% masa eksploziva za Amonex1:
m_e = [ 0.1  0.2  0.5 ]'; % kg

% gustina tla (asfalt):
ro_tla = 2000.; % kg/m^3

Pk_100 = (2.*14.*155.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca (projekcija)

Pk_200 = Pk_100;
%       1/2 omotaca (projekcija)

Pk_500 = (2.*25.*180.)*1.e-06;
%       1/2 omotaca (projekcija)

% zapremina kratera dobijena eksperimentalnim putem:
V_k = [ (0.20*0.08*0.012*pi())/12.
        (0.20*0.11*0.015*pi())/12.
        (0.28*0.20*0.05*pi())/12. ];

pi_1(1) = ro_e * Pk_100^(3/2) / m_e(1);
pi_2(1) = ro_tla * Pk_100^(3/2) / m_e(1);
PI_1(1) = V_k(1) / Pk_100^(3/2);

pi_1(2) = ro_e * Pk_200^(3/2) / m_e(2);
pi_2(2) = ro_tla * Pk_200^(3/2) / m_e(2);
PI_1(2) = V_k(2) / Pk_200^(3/2);

pi_1(3) = ro_e * Pk_500^(3/2) / m_e(3);
pi_2(3) = ro_tla * Pk_500^(3/2) / m_e(3);
PI_1(3) = V_k(3) / Pk_500^(3/2);

[X,Y] = meshgrid(pi_1, pi_2);
amonex1_vol = zeros(size(3,1), size(3,1));
for k = 1:3
    amonex1_vol(k,k) = PI_1(k);
end
Z = amonex1_vol;

figure(1)
surf(X,Y,Z);
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('AMONEX1 linear');
```

```
% Determine the minimum and the maximum x and y values:
xmin = min(pi_1);
xmax = max(pi_1);
ymin = min(pi_2);
ymax = max(pi_2);

% Define the resolution of the grid:
xres = 800;
yres = 800;

% Define the range and spacing of the x- and y- cooridnates,
% and then fit into X and Y:
xv = linspace(xmin,xmax,xres);
yv = linspace(ymin,ymax,yres);
[Xinterp,Yinterp] = meshgrid(xv,yv);

% :
z = V_k;

% Calculate Z in the X-Y interpolation space, which is an
% evenly space grid:
Zinterp = griddata(pi_1,pi_2,Z,Xinterp,Yinterp,'cubic',{'Pp','QJ'});

for k = 1:3
    V_cubic(k) = griddata(pi_2,pi_2,Z,pi_1(k),pi_2(k),'cubic');
    resid_cubic(k) = V_cubic(k) - Z(k);
end

figure(2)
mesh(Xinterp,Yinterp,Zinterp)
xlabel('\pi_1');
ylabel('\pi_2');
zlabel('\pi_3');
title('AMONEX1 cubic');
hold on
plot3(pi_1,pi_2,Z,'marker',
'o','markerfacecolor','r','linestyle','none')
```

ПРИЛОГ 5. Изјава о ауторству

Прилог 5.

Изјава о ауторству

Потписани-а мр Ивана Бјеловук

број индекса 12-16/97

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ФОРЕНЗИЧКА АНАЛИЗА И МОДЕЛИРАЊЕ КАРАКТЕРИСТИКА КРАТЕРА НАСТАЛОГ ПРИ ПОВРШИНСКОЈ ЕКСПЛОЗИЈИ БРИЗАНТНОГ ЕКСПЛОЗИВА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 13.1.2014.

Ивана Бјеловук

ПРИЛОГ 6: Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Прилог 6.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Ивана Бјеловук

Број индекса 12-16/97

Студијски програм Војно машинство-системи наоружања

Наслов рада **ФОРЕНЗИЧКА АНАЛИЗА И МОДЕЛИРАЊЕ КАРАКТЕРИСТИКА КРАТЕРА НАСТАЛОГ ПРИ ПОВРШИНСКОЈ ЕКСПЛОЗИЈИ БРИЗАНТНОГ ЕКСПЛОЗИВА**

Ментор проф. др Слободан Јарамаз

Потписани/а мр Ивана Бјеловук

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 13.1.2014.

Ивана Бјеловук

ПРИЛОГ 7. Изјава о коришћењу

Прилог 7.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ФОРЕНЗИЧКА АНАЛИЗА И МОДЕЛИРАЊЕ КАРАКТЕРИСТИКА КРАТЕРА НАСТАЛОГ ПРИ ПОВРШИНСКОЈ ЕКСПЛОЗИЈИ БРИЗАНТНОГ ЕКСПЛОЗИВА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 13.1.2014.

Ивана Јеловац

1. **Ауторство** - Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство - некомерцијално** – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство - некомерцијално** – делити под истим условима.. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прераде.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство** - делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.

БИОГРАФИЈА

Ивана Бјеловук, р. Ђорђевић рођена у Београду 1971. завршила је основну школу, гимназију (просек оцена 5,00) и Машински факултет Универзитета у Београду (просек оцена 8,10). Одбранила је дипломски *Конструкција метка кал.38 са поткалибарним зрном* (оцена 10) и магистарски рад *Форензичка карактеризација трагова дејства бризантних експлозива на подлогу и околину*–ментор проф. др Слободан Јарамаз.

Од `98. запослена у МУПРС-Виша школа унутрашњих послова, положила стручни испит и стручна усавршавања (Криминалистичко технички курс; Обука кадровске базе из Криминалистичко-техничке обраде места кривичних дела; Курс за тренере, Курс за израду наставних планова и програма; Специјалистичке семинаре за Вештачење новца и Интернационално организовано кријумчарење наркотика). Обавила стручну праксу у МУП. Радила као Стручни сарадник-предмет Криминалистика-техника, а `05. изабрана за наставника-звање предавач. Ангажована у настави на курсевима МУП: Криминалистичко-технички; за контролу и регулисање саобраћаја; за Физичко-техничко обезбеђење; за мултиетничку полицију и Основни курс противдиверзионе заштите. Од `06. запослена на Криминалистичко-полицијској академији-предавач на криминалистичко-форензичкој научној области-предмети: Основи криминалистичке технике, Криминалистичко-форензичка обрада лица места, Форензичко инжењерство и Форензичке методе идентификације материјала. Ангажовање на пројектима: Развојно-сарадднички пројекат шведске и српске полиције за унапређење обраде лица места `04-`08; Евалуација квалитета наставног процеса студијских програма КПА,`09–`11; Специфичности криминалистичко-форензичке обраде места догађаја кривичних дела,`12–`15. Била члан Савета КПА `07-`10. а од 2010. обавља функцију Председника Савета. За изузетне резултате у развоју полицијског школства награђена од стране Министра унутрашњих послова. Члан је Интернационалне полицијске асоцијације и Интернационалне асоцијације криминалиста. Аутор више научних и стручних радова, монографије и Практикума за криминалистичку технику.