

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Миодраг Ј. Лисов

**НАТПРИТИСАК БАРУТНИХ ГАСОВА ПРИ
ОПАЉЕЊУ ИЗ МИНОБАЦАЧА**

докторска дисертација

Београд - 2018

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Miodrag J. Lisov

**OVERPRESSURE OF POWDER GASES DURING
FIRING FROM MORTAR**

Doctoral Dissertation

Belgrade - 2018

Комисија за преглед и одбрану рада:

Ментор: проф. др Слободан Јарамаз, дипл. инж.
Машински факултет, Универзитет у Београду

Комисија:

др Дејан Мицковић, дипл. инж.
Машински факултет, Универзитет у Београду

др Цветко Црнојевић, дипл. инж.
Машински факултет, Универзитет у Београду

др Предраг Елек, дипл. инж.
Машински факултет, Универзитет у Београду

др Мирко Козић, дипл. инж.
Војнотехнички институт, Београд

датум одбране:

ИЗВОД

НАТПРИТИСАК БАРУТНИХ ГАСОВА ПРИ ОПАЉЕЊУ ИЗ МИНОБАЦАЧА

Овај рад је проистекао из вишегодишњег истраживања и развоја у области минобацачких и артиљеријских система. Реализација истраживања је вршена кроз пројектовање и развој нових и модернизацију постојећих система. У склопу ових активности реализована је и нова муниција веће ефикасности и бољих балистичких карактеристика. Значајан сегмент рада на овим системима било је пројектовање и развој нових барутних пуњења.

Током реализације нових балистичких решења детаљно су истраживане и проучаване пратеће појаве које се јављају у процесу опаљења. Узрок ових појава је нагло истицање барутних гасова из цеви оруђа. Као доминатне, препознате су и истраживане појаве настајања и ширења ударних таласа и повећања притиска који се јављају око оруђа.

Из тог разлога је извршено њихово истраживање, које је обухватило моделирање и прорачун поља натпритиска око минобацача, ради одређивања његовог интензитета и расподеле у простору и времену.

У циљу реалног описивања поменутих појава дата је теоријска поставка, а затим је извршено нумеричко моделирање истицања барутних гасова из цеви минобацача.

Детаљно је објашњена примењена експериментална метода мерења натпритиска, са описом припадајуће опреме и коришћеним мерним уређајима.

Приказани су наставци, облика цилиндра и млазника, који су постављени на уста цеви. Анализиран је њихов утицај на смањење интензитета натпритиска, на месту посаде. Наведени наставци су коришћени и за постављање давача за мерење притиска барутних гасова током њиховог истицања из цеви минобацача.

Резултати постојеће аналитичке методе и нумеричког модела прорачуна, интензитета натпритиска барутних гасова, на карактеристичним мерним местима,

око оруђа, су поређени са експерименталним резултатима, на основу чега су дати одговарајући закључци и тумачења.

У прилогу су приказани резултати прорачуна са просторним распоредом и временском променом интензитета следећих параметара:

- брзине истицања гасова (Махов број),
- густине гаса,
- натпритиска око минобацача и
- масеног удела продуката сагоревања барутног пуњења.

Експериментални резултати су дати у облику дијаграма промене натпритиска, проузрокованог наглим истицањем барутних гасова, на карактеристичним мерним местима за случај гађања из минобацача 120 mm.

Кључне речи: појаве на устима цеви, ударни талас, натпритисак барутних гасова, нумеричка динамика флуида, гасодинамика, међубалистика, унутрашња балистика, експериментална балистика, минобацачи.

Научна област: војно машинство - системи наоружања

Ужа научна област: међубалистика

ABSTRACT

OVERPRESSURE OF POWDER GASES DURING FIRING FROM MORTAR

This paper resulted from many years of research and development activities in the area of mortar and artillery systems. The realization has been conducted through design and development of new and through the upgrade of the available systems. In scope of these activities new ammunition of greater efficiency and better ballistic characteristics have been realized. The significant segment of work on these systems was design and development of new powder charges.

During the realization of new ballistic solutions the phenomenon that follow in the process of firing were researched and studied in detail. The cause for these phenomena is the instantaneous flow of powder gases from the mortar barrel. The circumstances of appearance and expanding of the blast and increasing the pressure which take place around the weapons have been recognized and researched as dominant. For that reason, the investigation have been done which comprised modeling and computation of overpressure field around the mortar, with the aim of determining its intensity and distribution in space and time. With the aim of real description of the mentioned events, the theoretical setting of the problems with numerical simulation the blast field around the mortar barrel is given.

In the attachments of the dissertation, there are computation results provided with the spatial over time distribution and change of intensity of the following parameters:

- gases flow velocity (Mach number),
- gas density,
- overpressure around the mortar and
- mass fraction of the products of powder charge combustion.

The applied experimental method of measuring the overpressure, together with the additional equipment and used measuring devices, have been explained in details.

The devices are shown, in shape of cylinder and nozzle, which are placed to the mortar muzzle. Their contribution to reducing of overpressure intensity at the position of crew has been analyzed. The listed devices were also used for placing the sensor for measuring the pressure of powder gases during their flow from the mortar barrel.

The results of classical and numerical computation of overpressure intensity of powder gases, at the characteristic measuring points, were compared to the experimental results, obtained in firing testing.

As a part of the attachment, the experimental results are given, shaped as a diagram of overpressure in a function of time, caused by instantaneous powder gases flow, at the measuring points for different weapons and mortars.

Key words: muzzle blast phenomenon, overpressure of powder gases, computational fluid dynamics, gas dynamics, intermediate ballistics, internal ballistics, experimental ballistics, mortars.

Scientific field: military mechanical engineering - weapon systems

Scientific subfield: intermediate ballistics

САДРЖАЈ:

ИЗВОД	4
ABSTRACT	6
СКРАЋЕНИЦЕ	11
ОЗНАКЕ	13
1. Уводна разматрања	17
1.1. Проблем истраживања.....	19
1.2. Предмет истраживања	21
1.3. Циљеви истраживања	22
1.4. Примењене методе истраживања	23
1.5. Основне хипотезе и хипотетички оквир	25
2. ОПИС ПРОБЛЕМА	27
2.1. Преглед досадашњих истраживања	27
2.2. Полазна унутрашњебалистичка разматрања.....	35
2.3. Гасодинамичке појаве при опаљењу из оруђа	40
2.3.1. Појаве на устима цеви	40
2.3.2. Притисак на дно пројектила	42
2.3.3. Бљесак на устима цеви оруђа.....	46
2.3.4. Ударни талас око оруђа	49
2.3.5. Натпритисак око оруђа.....	52
3. ТЕОРИЈСКА И НУМЕРИЧКА ПОСТАВКА ПРОБЛЕМА	55
3.1. Увод у теоријске основе нумеричке динамике флуида	55
3.2. Систем билансних једначина	56
3.3. Метода коначних запремина.....	60
3.4. Нумеричке мреже.....	63
3.4.1. Неструктурисане мреже	64
3.5. Закључак о нумеричком моделирању у динамици флуида	65
3.6. Параметри у софтверу ANSYS FLUENT	65
3.7. Адаптивне мреже	69
3.7.1. Прерасподела мреже	70

3.7.2. Генерисање мреже додавањем тачака	71
3.7.3. Тренд у стварању мрежа	72
4. ФИЗИЧКО-МАТЕМАТИЧКИ И НУМЕРИЧКИ МОДЕЛ	73
4.1. Поступак нумеричке симулације	73
4.2. Промене притиска барутних гасова током истицања	76
4.3. Једначина промене температуре гаса током истицања	79
4.4. Почетни и гранични услови	81
5. РАЗМАТРАЊЕ КОНСТРУКЦИОНИХ РЕШЕЊА ЗА УМАЊЕЊЕ БЛАСТ ЕФЕКТА	83
5.1. Конструкциона решења за умањење бласт ефекта	84
5.2. Осврт на светска решења	87
6. ГАСОДИНАМИЧКИ ПРОРАЧУНИ	94
6.1. Прорачун аналитичком методом "Орлова"	94
6.2. Гасодинамички прорачун са физичко-математичким моделом	100
6.2.1. Дводимензионална (2D) нумеричка симулација	101
6.2.2. Тродимензионална (3D) нумеричка симулација	108
6.3. Унутрашњебалистички прорачуни	109
7. МЕТОДОЛОГИЈА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА И МЕРЕЊА	113
7.1. Опис мерне методе и поставка мерења	115
7.2. Предмет и циљ експерименталних испитивања	120
7.3. Преглед извршених испитивања	122
7.3.1. Организација и начин извршења опита	122
7.3.2. Испитивања гађањем	123
7.4. Преглед резултата испитивања	126
7.4.1. Испитивање са минобацачем 120 mm M95 и мином M62П6	126
7.4.2. Испитивање са минобацачем 120 mm M95 и мином XM95	131
8. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА	135
8.1. Анализа резултата прорачуна	137
8.1.1. Аналитичка метода прорачуна (метода Орлова)	137
8.1.2. Гасодинамичка метода прорачуна (2D)	139
8.2. Анализа експерименталних резултата	142

8.3. Закључци анализе резултата	147
9. ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕДЛОЗИ	149
9.1. Рекапитулација докторске дисертације	149
9.2. Закључци	150
9.3. Предлози за даљи рад	152
10. ЛИТЕРАТУРА	153
11. ПРИЛОЗИ	158
Биографски подаци аутора	250

СКРАЋЕНИЦЕ

- A - нумерички домен (површина)
- АД - аналогно-дигитална (конверторска картица)
- BAD - Уређај за пригушење "бласт ефекта" (Blast Attenuation Device)
- BOP - Натпритисак на устима цеви (Blast overpressure)
- BWIP - Blast Wave Identification Parameter
- ВД - Великог домета
- V - ...нумерички домен (запремина)
- ЕИ - Екструдовано импрегнирани (барут)
- КВ - коаксијални вод
- ЛТФ - Лака тренутно фугасна (минобацачка мина)
- МБ - Минобацач
- М - Мерно место за мерење притиска
- ММ - Мерно место за мерење натпритиска
- НГБ - Нитроглицерински барут
- НП - носач података
- NSJ - Систем Навије-Стоксових једначина
- ОЈ - Ојлерове једначине
- ПЈ - посредна јединица
- ПТУ - против-трзајући уређај
- ПП - претварач притиска
- PDJ - Парцијалне диференцијалне једначине
- RANS - Систем Навије-Стоксових једначина осредњених по времену

- SRAMS - Супер брзи напредни МБ систем (Super Rapid Advanced Mortar System)
- STK - Singapore Technologies Kinetics
- СУВ - систем за управљање ватром
- ТФ - тренутно фугасна
- UDF - функције које дефинише корисник (Users Defined Functions)
- УТ - Ударни талас
- FDM - Метода коначних разлика (Finite Difference Method)
- FEM - Метода коначних елемената (Finite Element Method)
- FVM - Метода коначних запремина (Finite Volume Method)
- CV - Контролна запремина (Control Volume)
- CVS - Контролна запремина-површина (Control Volume-Surface)
- CFD - Нумеричка динамика флуида (Computational Fluid Dynamics)
- CFL - Курант Фридрих - Леви број (Courant-Friedrichs-Lewy)
- CNS - Конзервативна форма система Навије-Стоксових једначина (Navier-Stokes conservative form)
- CS - Контролна површина (Control Surface)
- 2D - дводимензионално
- 3D - тродимензионално

ОЗНАКЕ

- a - брзина звука
- B - извори масе, количине кретања и енергије
- V_k - брзина пројектила на крају процеса сагоревања
- V_m - брзина пројектила у тренутку достизања максималног притиска
- V_d - растурање пројектила по домету [m]
- V_p - растурање пројектила по правцу [m]
- v_0 - брзина пројектила на устима цеви
- V_∞ - брзина непоремећене струје, [m/s]
- G - вектор дисипативног флукса
- D_e - пречник излазног пресека млазника (m)
- D_c - пречник цеви (калибар) (m)
- e - унутрашња енергија по јединици масе, [J/kg]
- E - тотална енергија по јединици масе, [J/kg]
- k - однос специфичних топлота при констант. притиску и запремини (c_p/c_v)
- K_1 - коефицијент који узима у обзир механизам опструјавања пројектила барутним гасовима
- K_c - коефицијент у изразу за притисак, код цилиндричног наставка [1/ms]
- K_m - коефицијент у изразу за притисак, код дивергентног млазника [1/ms]
- ℓ - текући пут пројектила
- L_{uk} - дужина канала цеви
- ℓ_p - пређени пут пројектила на крају периода накнадног дејства барутних гас.
- M - Махов број

M	- моларна маса гаса [kg/kmol]
M_∞	- Махов број непоремећене струје
\dot{m}	- масени проток гаса из цеви
n	- нормала на границу нумеричког домена
n_1, n_2	- опитни коефицијенти, који су једнаки и сматра се да имају вредност 2
p	- притисак барутних гасова, притисак [Pa]
p_v	- вршни натпритисак
p_k	- притисак на крају процеса сагоревања
p_{kr}	- критични притисак на устима цеви оруђа на почетку истицања
p_m	- највећи (максимални) притисак барутних гасова [Pa]
$p_{m\text{ torm}}$	- повећани притисак барутних гасова (торментачни притисак) [Pa]
p_{pr}	- притисак који делује на дно пројектила
p_p	- притисак припале
p_p	- почетни притисак гасне стурје, у једначини притиска [Pa]
P_r	- Прантлов број
p_{sr}	- средњи притисак, за цео период накнадног дејства барутних гасова
p_z	- притисак који делује на затварач
p_u	- притисак барутних гасова на устима цеви у тренутку изласка пројектила
p_o	- притисак покретања пројектила (притисак форсирања)
p_1	- притисак гаса у непоремећеној средини
p_2	- притисак гаса у фронту ударног таласа
p_∞	- притисак у непоремећеној струји, [Pa]
r	- доведена топлота по јединици масе, [J/kg]
R	- растојање од уста цеви до места за које се одређује вредност натпритиска

R_e	- Рејнолдсов број
R_k	- универзална гасна константа (обележена са индексом (k) због двојности означавања)
S	- површина попречног пресека канала цеви
s	- површина дна пројектила
S_g	- површина попречног пресека гасне струје
t	- време [s]
T	- температура [K]
T	- трајање основног импулса натпритиска
T_a	- "А" трајање ваздушног ударног таласа
T_b	- "Б" трајање ваздушног ударног таласа
T_p	- почетна температура гасне струје, у једначини температуре [K]
T_u	- температура барутних гасова у тренутку истицања из цеви
t_0	- време од опаљења до покретња пројектила (претходни период)
t_k	- време на крају процеса сагоревања
t_m	- време у тренутку достизања максималног притиска
u_1, u_2, u_3	- компоненте брзине флуида у правцима оса Декартовог коорд. система
U	- вектор конзервативних величина по јединици масе
F	- вектор конвективног флукса
h	- висина ватрене линије
c_k	- коефицијент у изразу за коефицијент накнадног дејства барутних гасова
c_p	- специфична топлота при константном притиску, [J/kgK]
c_v	- специфична топлота при константној запремини, [J/kgK]

- Q - однос производа коефицијента накнадног дејства барутних гасова (β) и брзине пројектила на устима цеви (v_0) са брзином звука (a)
- X_k - пут пројектила на крају процеса сагоревања
- X_m - пут пројектила у цеви у тренутку достизања максималног притиска, [m]
- X_{max} - највећи (максимални) домет пројектила [m]
- W - запремина гасова у функцији растојања R тачке, за коју се одређује вредност натпритиска Δp
- W_{kn} - запремина канала цеви
- W_0 - почетна запремина барутне коморе
- β - коефицијент накнадног дејства барутних гасова
- Δp - натпритисак
- Δt_p - период накнадног дејства барутних гасова
- μ - динамичка вискозност флуида [Pas]
- ψ - угао истицања барутних гасова из гасне кочнице, у односу на правац гађања
- ρ - густина флуида [kg/m³]
- σ - коефицијент који дефинише количину гасова на излазу из отвора гасне кочнице
- τ - вискозни напон [N/m²]
- φ - угао који заклапа линија која пролази кроз уста цеви и место за које се одређује вредност натпритиска у односу на вертикалну раван гађања
- Φ - функција дисипације
- ω_0 - маса основног барутног пуњења [kg]
- ω - маса допунског барутног пуњења [kg]

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Многе савремене армије у свету, концепт оружаних снага и употребу копнене војске базирају на ефикасним и брзо покретним јединицама. За реализацију овог концепта неопходно је садејство добро оспособљених и модерно опремљених јединица ватрене подршке. Из тог разлога све је израженији процес модернизације класичне артиљерије и потреба савремених армија света да класична артиљерија и даље задржи водећу улогу у оружаним снагама.

Овај процес модернизације обухвата, како сама артиљеријска оруђа, муницију и средства за управљање ватром, тако и начин употребе артиљерије за ватрену подршку. Изражена је оријентација примене новог концепта самоходне артиљерије на точкашкој шасији уз увођење у оперативну употребу нових далекометних интелигентних пројектила и савремених система за управљање ватром.

Досадашња концепција, да се вучена оруђа користе за ватрену подршку углавном пешадијских састава, а самоходна оруђа за подршку тешких оклопно-механизованих састава, у основи је превазиђена. Новом оријентацијом самоходна оруђа ватрене подршке на точкашким шасијама, готово у свакој улози, осим у специјалним ситуацијама када су ултра лака оруђа незаменљива, представљају више него адекватну алтернативу за вучена и гусенична оруђа ватрене подршке. Њихове предности у односу на вучена оруђа су повећана вероватноћа преживљавања на бојишту, боља тактичка покретљивост и поједностављена логистичка подршка.

Све поменуте категорије артиљеријских оруђа: вучена, самоходна точкашка и самоходна гусенична оруђа, обједињује заједнички тренд унификације на калибар 155 mm, са дужином цеви од 52 калибра.

Овај концепт примене ефикасних, лакопокретних борбених система изражен је и код минобацачких система, а њихова реализација се најчешће односи на калибар 120 mm, са могућношћу остварења повећаног домета.

Једна од новина која је постала могућа увођењем у употребу савремених система за управљање ватром, аутоматских пуњача и интелигентне муниције је техника испаливања више метака, из једног оруђа, са различитим барутним пуњењима и под различитим елевацијама цеви, тако да пројектили падају на циљ у приближно истом тренутку. Овом техником се остварује ефекат на циљу, кога карактерише велика густина ватре и прецизност. Примењена техника гађања отвара могућност, да се са мањим бројем артиљеријских оруђа, уз употребу класичне или интелигентне муниције, поред површинских и групних циљева могу уништавати и стационарни, односно покретни тачкасти циљеви, са повећаном брзином реаговања и гађања.

У последње време је изражена тенденција повећања домета класичних артиљеријских оруђа ватрене подршке конструисањем пројектила са генератором гаса или комбинацијом ракетног мотора и генератора гаса. Оваквим пројектиlima се остварује знатно повећање домета.

Напредак у технологији производње барута и сагорљивих елемената барутног пуњења, омогућио је увођење у оперативну употребу модуларних барутних пуњења, најчешће бимодуларног типа, која у великој мери олакшавају логистичку подршку артиљеријских јединица и омогућавају брз и једноставан избор модула, као и оптималну потрошњу расположивих барутних пуњења, односно модула у аутоматским пуњачима.

У циљу побољшања тактичко-техничких карактеристика артиљерије, у процесу пројектовања и развоја, намеће се потреба за освајањем нових, концепцијски савременијих, артиљеријских система или се врши оријентација ка модернизацији постојећих система. Поред нових захтева, који се односе на повећање покретљивости артиљеријских јединица и превођења вучених варијанти артиљеријских оруђа у самоходне варијанте, као стална потреба унапређења

артиљерије, намеће се захтев за повећањем домета, прецизности и ефикасности, што подразумева примену муниције, нове генерације.

За гађање са овом муницијом, пројектују се нова, врло моћна барутна пуњења, модуларне или класичне организације, која остварују значајно повећање почетне брзине пројектила, при чему се најчешће постижу и веће вредности радних притисака у комори оруђа. Повећање радног притиска и већа количина барутних гасова, који истичу из цеви артиљеријског оруђа, у значајној мери утичу на повећање нивоа натпритиска око оруђа. Сличне појаве се манифестују и код самоходних и вучених минобацача, великог домета, где је такође циљ остварење повећаног домета и ефикасности на циљу.

Са друге стране, захтев за повећањем ватерене моћи борбених система, доводи до потребе за реализацијом повећања брзине ватре, а све са циљем већег учинка оствареног ватреним дејством, односно повећања вероватноће погађања и уништења одабраног циља.

Повећање брзине гађања, односно броја импулсних напрезања, сложене борбене системе, као што су самоходна аутоматизована артиљеријска оруђа, чини рањивијим и у целини и утиче на ниво њихове поузданости током борбених дејстава. Ово се дешава због тога што поседују велики број електро-механичких компоненти и подсистема, који су у процесу опаљења изложени различитим врстама напрезања, као што су: импулсна, инерцијална и механичка напрезања, вибрације и дејство натпритиска барутних гасова.

1.1. Проблем истраживања

Повећање максималног домета, које се остварује бољим аеродинамичким карактеристикама пројектила и конструкционим измена на оруђу, захтева и употребу већих, односно моћнијих, барутних пуњења која за последицу имају повећање радног притиска у цеви оруђа и већу продукцију барутних гасова, што доводи до повећања натпритиска око оруђа. Поред тога већа ватрена моћ се остварује повећањем брзине гађања и доводи до повећања броја импулсних напрезања, којима је изложена посада артиљеријског оруђа, што се манифестује

кроз појаву већег натпритиска око оруђа и већег броја ударних таласа у току интервала ватреног дејства.

Ово намеће потребу решавања проблема повећаног натпритиска барутних гасова око оруђа у поступку њиховог пројектовања, без обзира да ли се ради о модернизацији постојећих или пројектовању нових оруђа.

Проблем истраживања, који се решава у овој дисертацији, реализује се кроз опис и моделирање гасодинамичких појава, које се дешавају током процеса опаљења, како би се на основу прорачунатих вредности натпритиска око оруђа, по указаној потреби извршила измена пројектованог оруђа, односно потребна конструкциона подешавања.

У току пројектовања и развоја нових или модернизације постојећих артиљеријских оруђа и минобацача, потребно је интегрисаном анализом извршити оптимизацију предметног борбеног система са аспекта пројектованих карактеристика, како би се остварио прихватљив ниво напрезања који трпи посада у току ватреног дејства, првенствено услед интензивног истицања барутних гасова, које је праћено појавом ударних таласа и пољем натпритиска у зони око оруђа.

Ово је посебно значајно код минобацача, где је извршилац гађања (нишанџија) у непосредној близини цеви, током поступка пуњења и опаљења оруђа. Оваква оптерећења су нарочито изражена у режиму брзе и рафалне паљбе.

Полазне техничке карактеристике артиљеријског оруђа или минобацача, дефинисане у процесу предпројектовања, често је потребно делимично кориговати, кроз процес развоја, у циљу изналажења оптималног решења, са аспекта техничко-технолошких параметара, као и могућег утицаја натпритиска ударног таласа барутних гасова на посаду. Анализа овог утицаја се уводи у поступак пројектовања, како наведени ефекти дејства не би довели до прекомерног оптерећења посаде оруђа.

Наведена оптерећења могу изазвати озбиљније здравствене проблеме, односно трајна оштећења здравља.

Из наведених разлога је потребно познавање механизма настајања пратећих појава које се манифестују у току процеса опаљења, како би се извршило њихово

физичко-математичко моделирање и израчунавање вредности карактеристичних гасодинамичких величина.

За верификацију теоријске поставке и примењеног физичко-математичког модела неопходна је примена одговарајуће експерименталне методе мерења, којом би се верификовала предметна претпоставка.

1.2. Предмет истраживања

Предмет истраживања у дисертацији подразумева да се кроз проучавање сложених гасодинамичких појава, које се манифестују у процесу опаљења, изнађе одговарајуће решење за смањење интензитета натпритиска око оруђа, односно да се његов интензитет сведе на прихватљив ниво.

Изучавање ових појава ће бити реализовано у склопу неколико целина, које произилазе из разматрања предмета саме дисертације, а то су:

1. научна дескрипција феномена натпритиска и ударног таласа,
2. преглед досадашњих истраживања на пољу проучавања разматраних феномена,
3. дефинисање релевантних унутрашњебалистичких, конструкцијских и других параметара који утичу на проучаване појаве,
4. израда физичко-математичког модела који реално описује поменуте физичке појаве,
5. нумеричко решење физичко-математичког модела, који квантитативно описује интензитет поља натпритиска око цеви разматраног оруђа,
6. дефинисање експерименталне методе мерења,
7. експериментална верификација предложеног физичко-математичког модела са нумеричком симулацијом

8. експериментална верификација предложених решења за смањење интензитета натпритиска, мерењем карактеристичних величина током опита гађања на полигону,
9. анализа добијених прорачунских и експерименталних резултата.

1.3. Циљеви истраживања

Општи циљ истраживања је да се успостави одговарајућа теоријско-прорачунска метода, која ће у поступку пројектовања оруђа, дати одговор по питању интензитета и расподеле поља натпритиска око оруђа и евентуалних конструкционих ограничења која произилазе из тога.

Предметна метода је коришћена у поступку пројектовања и развоја минобацачког система 120 mm, великог домета, а може се применити и на друга оруђа и оружја са осносиметричном сликом струјања на устима цеви.

Коначан циљ је реализација целовитог прорачуна поља натпритиска, на бази предложеног теоријског модела, који ће бити верификован кроз реализацију одговарајућих експеримената и примењене методе мерења.

Овим би се наведена метода имплементирала у поступку оптимизације техничких карактеристика пројектованог система, поред осталог, и са аспекта препорученог и дозвољеног нивоа оптерећења, коме би била изложена посада предметног оруђа. Ова метода се може применити на горе наведена оруђа, а посебно на она где је посада непосредно изложена дејству натпритиска.

Да би предложено истраживање имало потпуно научно и стручно утемељење, биће урађени одговарајући унутрашњебалистички и гасодинамички прорачуни. У циљу визуелне детекције појаве "бласт ефекта", током реализације опитних гађања, извршиће се потребна снимања ултра-брзом камером.

Циљеве истраживања у овој дисертацији можемо дефинисати кроз:

- формирање одговарајућег физичко-математичког и нумеричког модела у циљу симулације реалних гасодинамичких појава, које се дешавају у процесу опаљења, а манифестују се интензивним истицањем барутних гасова из цеви,
- примену одговарајућег софтверског пакета, у склопу реализације општег циља истраживања,
- дефинисање експерименталне методе мерења, на бази које ће се извршити верификација физичко-математичког модела са прорачуном,
- тестирање и верификацију физичко-математичког модела и нумеричког прорачуна, кроз експерименталну проверу, примењену на испитиваном оруђу.

1.4. Примењене методе истраживања

Истраживања презентована у овом раду су у основи теоријско-експерименталног карактера и представљају комбинацију теоријских и експерименталних метода научног истраживања. Сама чињеница да је феномен истраживања у значајној мери комплексан, указује на потребу да спроведена теоријска истраживања буду верификована кроз примењену експерименталну методу.

Полазећи од наведених поступака истраживања, а имајући у виду циљеве, који су планирани да се остваре током реализације ове дисертације, могуће је користити следеће научне методе: дескрипцију и експликацију, анализу и синтезу, физичко-математичко моделирање, компаративну анализу и класификацију, дигиталну обраду сигнала и експерименталну верификацију.

Метода дескрипције и експликације ће бити коришћена у описивању појава, стања и добијених резултата.

Анализа и синтеза ће се користити у проучавању појава које прате процес опаљења.

Математичко моделирање ће се користити да се уз одговарајућа упрошћења, са прихватљивим нивоом тачности, опишу и дефинишу гасодинамички процеси.

Компаративна анализа и класификација ће се користити у оцени предложених решења.

Метода обраде сигнала ће се применити на експерименталне резултате, добијене током снимања брзих физичко-техничких појава.

За мерење физичких величина, као што су брзина пројектила, притисак барутних гасова и натпритисак око оруђа, користиће се методе мерења које су развијене у Лабораторији за експерименталну балистику Војнотехничког института.

Због комплексности предмета истраживања који изискује потребу разноврсних извора података, водиће се рачуна о томе да извори података буду примерени предмету истраживања.

У реализацији истраживања, у оквиру докторске дисертације, коришћени су подаци којима располаже Војнотехнички институт, као и друге установе и институције система МО и Војске Србије.

По критеријуму изворности коришћени се посредовани и изведени извори. Изворни подаци биће прикупљени из одређених стручних часописа са доказаним реномеом.

Посредовани подаци прикупљени су од лица која су експерти у разматраним стручним области.

Као извор изведених података коришћени су подаци из страних армија који се могу наћи у билтенима, стручним часописима, интернет сајтовима, итд.

По критеријуму јавности коришћени су углавном јавни и интерни извори података који су садржани у литератури.

По критеријуму спољних својстава биће коришћени подаци примерени предмету истраживања, односно мерни и визуелни извори података.

1.5. Основне хипотезе и хипотетички оквир

Основна хипотеза подразумева да је могуће дефинисати интегралну теоријско-прорачунску методу, која би омогућила да се у раној фази пројектовања у потпуности одреде сви неопходни гасодинамички параметри, који одређују стање гасне струје и поља натпритиска, око оруђа, током процеса опаљења.

Разрадом основне хипотезе ће се омогућити целовито сагледавање свих параметара који имају утицај на процес пројектовања минобацача и на његове техничке карактеристике. Из тог разлога је неопходно познавати механизме настанка и параметре који доминантно утичу на вредност натпритиска ударног таласа, који се генерише у процесу опаљења.

Предметна теоријско-прорачунска метода између осталог има за циљ да у домену међубалистике, кроз проучавање предметног феномена, унапреди процес пројектовања минобацача, односно оруђа и оружја у целини, како би се поуздано дефинисали реални гасодинамички параметри у процесу опаљења.

У оквиру истраживања, која се односе на проучавање појаве натпритиска ударног таласа у процесу опаљења, предвиђене су следеће појединачне хипотезе:

- у циљу потпунијег сагледавања појаве ударног таласа барутних гасова и формирања поља натпритиска око оруђа, извршиће се дорада и комплетирање, постојећих теоријских поставки и израда одговарајућег гасодинамичког модела,
- могућа је израда целовите теоријско-прорачунске методе, која ће омогућити неопходне предуслове за успешно пројектовање и реализацију вучених и самоходних минобацача,
- могуће је израдити гасодинамички модел са прорачуном, који ће се реализовати на конкретном примеру минобацачког система 120 mm,

- могуће је предложити техничко решење за смањење интензитета натпритиска, на месту посаде, минобацача 120 mm повећаног домета,
- могуће је дефинисати целовиту методу мерења, чија ће примена у току реализације експерименталне фазе, обезбедити поуздане и квалитетне резултате мерења, а све у циљу верификације теоријске поставке са примењеним физичко-математичким и нумерчким моделом.

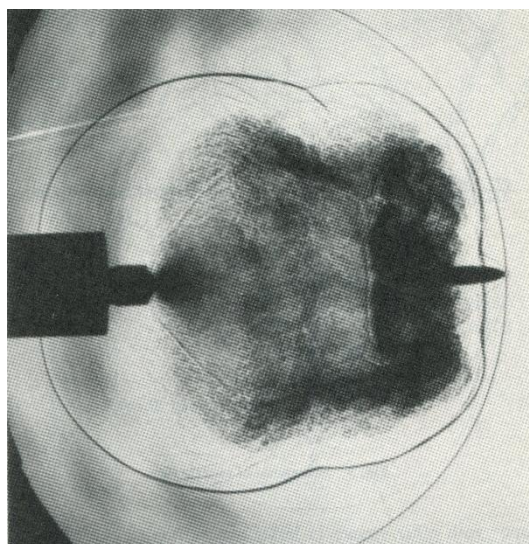
2. ОПИС ПРОБЛЕМА

2.1. Преглед досадашњих истраживања

Почетак проучавања физичких појава, које се односе на процес опаљења оруђа, а доминантно их карактеришу ударни таласи и натпритисак око оруђа, везује се за шездесете године прошлог века.

Овакве појаве, које карактеришу интензивна истицања гасова, односно импулсна струјања јављају се код: артиљеријских и ракетних гађања, лансирања ракета, наглих пражњења, приликом стварања ударних таласа у аеро-тунелима, опаљења пројектила из цеви оружја и других сличних појава. У том смислу је интересантно истраживање настанка и опадања млаза гасова и структуре ударног таласа истичућих барутних гасова и вадуха.

Приликом опаљења и током изласка пројектила из цеви оружја, испред уста цеви се јављају два импулсна млаза струје гаса (Сл. 2.1) [1].



Сл. 2.1—Приказ ударног таласа сабијеног ваздуха, који пројектил потискује из цеви и барутних гасова који истичу из цеви (пушка 5,56 mm)

Почетно струјно поље се развија тако што се потискује ваздух, који се налази у цеви испред пројектила, који под дејством барутних гасова започиње интензивно

кретања кроз водиште цеви. Након тога струјно поље се развија када се ослободе барутни гасови високог притиска пошто водећи прстен пројектила напусти цев. Такође ваља напоменути да се код артиљеријских пројектила, код којих долази до трошења водећег прстена и пре изласка пројектила из цеви део барутних гасова ослободи истицањем кроз слободан зазор између водећег прстена и цеви. Ова појава је карактеристична и за старија решења минобацачких мина, где је због начина пуњења минобацача потребно обезбедити зазор између мине и цеви, кроз који истиче део барутних гасова и пре изласка минобацачке мине из цеви. У принципу, гасови барутног пуњења, који имају велику енергију, брзо се шире "преко" првог струјног поља и практично га у потпуности прекривају. Оба струјања одражавају структуру суперсоничног подекспандираног млаза, затвореног у скоро сферичан ударни талас. У почетку ударни талас ограничава развијање млаза. Слабљење интензитета ударног таласа, услед сферичне експанзије, помера ова ограничења, дозвољавајући струји да се слободно шири. Касније промене у структури издувног млаза претежно зависе од смањења притиска на устима цеви, пошто опада интензитет истицања из цеви.

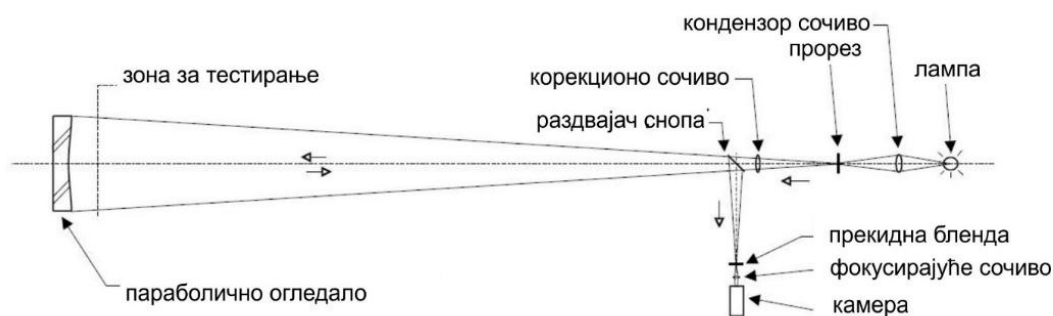
Сганс [2] је први објавио да је добио фотографију струјног поља гаса, при изласку пројектила, код опаљења из пушке, коришћењем такозване "šliren" технике, која подразумева метод добијања фотографије помоћу прореза, ова апаратура је приказана на слици 2.2 [3].

Низ добијених фотографија показује развој струјног поља ваздуха и барутних гасова. Нажалост ова техника прикупљања података није обезбедила одређивање временске базе, током снимања ове појаве.

Вискмастер [4] користи "šliren" технику и фотопојачавач за уочавање исијавања ударног таласа, како би проучавао експанзију гасова из уста цеви. Уочено кретање ударног таласа је показало да следи законитости, које се добро слажу са теоријом јаког ударног таласа.

Strashinov [5] и Naboko [6] су испитивали цилиндрично, осносиметрично струјање у циљу решења ове законитости дуж осе симетрије.

Користећи метод карактеристика, Oswatitsch [7] моделира струјно поље на устима цеви као сферични ударни талас. Његови резултати показују да су у области између уста цеви и унутрашњости ударног таласа, промене својстава струје пропорционалне са променама услова на устима цеви. Како су ове промене у релативној зависности од укупног времена трајања ширења ударног таласа, Oswatitsch закључује да се на делу између уста цеви и "Маховог диска", гасови који истичу из цеви могу моделирати као стационаран млаз.

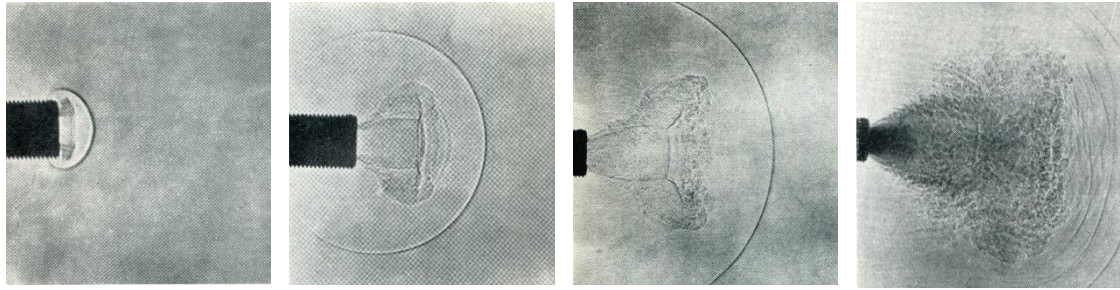


Сл. 2.2 – Приказ "Šliren" апаратуре за уочавање и снимање појаве ударног таласа

У референци [7] се наглашава да се адекватна апроксимација својстава дела гаса на устима цеви може добити коришћењем Rankine-Hugoniot једначине, уз претпоставку да је брзина гаса једнака брзини пројектила, у тренутку изласка пројектила из цеви. Oswatitsch ово заснива на чињеници да се за пројектиле са великом брзином најзначајније убрзање остварује у почетном делу кретања, близу барутне коморе, претпостављајући да је брзина пројектила релативно константна на завршном делу његовог пута у цеви.

Фотографије, добијене методом сенке, потврђују претпоставку о развоју струјања ваздуха испред пројектила, што се види и на Сл. 2.3, [2].

За податке изложене у овом раду, почетни тренутак се рачуна од момента када дно пројектила пређе уста цеви. Према томе, за струјање испред пројектила, времена пре изласка дна пројектила из цеви су негативна.



Сл. 2.3 - Развој прекурсора и примарног издувног ударног звона барутних гасова код опаљења из пушка 5,56 mm

Пошто гасови испред пројектила струје из уста цеви, шире се дводимензионално, формирајући један подекспандирани, суперсонични млаз. Развој овог млаза помера околни ваздух, стварајући скоро сферични ударни талас.

Развој овог типа струјања је испитиван у склопу са настанком ударног таласа приликом опаљења пројектила. Даља проучавања су потврдила претпоставку да је почетна експанзија гаса врло комплексна појава.

У референци [7] се користи ова стационарна апроксимација за оцену оптерећења на извесној категорији пројектила, али се при томе не разматрају и друге значајне појаве које се јављају на устима цеви. Међу њима су: ефекти почетне експанзије гасова барутног пуњења између дна пројектила и уста цеви и ефекти ударног дејства између струјања гасова барутног пуњења и слободног ваздуха који се креће испред пројектила. Како се ове појаве јављају близу уста цеви, где су максимални притисци гасова, било би оправдано тачније разматрање ове врсте проблема.

Касније је учињено више покушаја [8] и [9] да се примени метода коначних разлика да би се израчунала својства овог типа струјања. Ови прорачуни су доста добри за предвиђање развоја струјања гаса на устима цеви, међутим, тачност и ваљаност ових прорачуна мора бити потврђена експериментом.

Измерених вредности, односно квантитативних података, који се односе на ударни талас на устима цеви, било је јако мало. Први објављени резултати експерименталних мерења струјања око уста цеви углавном су се односили на пушку калибра 5,56 mm.

Техника којом се добија слика у временски раздвојеним интервалима, коришћена је да се детаљно конструишу путање уочљивих дисконтинуитета [10].

Дате су фотографије, не само струјања дуж осе симетрије, већ и чеоних граница. Проучаване појаве су снимане за време циклуса опаљења и показују настанак, развој и нестанак издувног ударног звона [11] и [12].

Једну од значајнијих аналитичких метода, која описује ове појаве, дао је руски научник Б.В.Орлов. У проучавању ових појава он полази од тога да је, током опаљења, брзина простирања поремећаја велика и да изазива снажно ударно сабијање околног ваздуха, око оруђа, што доводи до краткотрајног повећања натпритиска, у зони око оруђа [13].

Ради погодности проучавања појаве ударних таласа усвојена је претпоставка да је брзина распростирања таласа кроз непокретни околни ваздух ($v_1 = \beta v_o$). Овим је брзина простирања таласа (v_1) дата као производ коефицијента накнадног дејства барутних гасова (β) и брзине пројектила на устима цеви (v_o). Сагласно томе при судару гасног тока са непокретном препреком, динамичко повећање притиска се израчунава на основу једначине (2.1),

$$\Delta p = p_2 - p_1, \quad \Delta p = \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right) p_1 = \frac{2k}{k+1} (Q^2 - 1) p_1 \quad (2.1)$$

при чему је (Q) однос производа коефицијента накнадног дејства барутних гасова (β) и брзине пројектила на устима цеви (v_o) са брзином звука (a),

при чему је: $a = \sqrt{kR_k T_1}$.

Однос притиска гаса у фронту ударног таласа (p_2) и притиска гаса у непоремећеној средини (p_1) се израчунава на следећи начин:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2kQ^2 - (k - 1)}{k + 1}; \quad p_1 = \frac{\omega R_k T_u}{kW}; \quad Q = \frac{\beta v_o}{a}$$

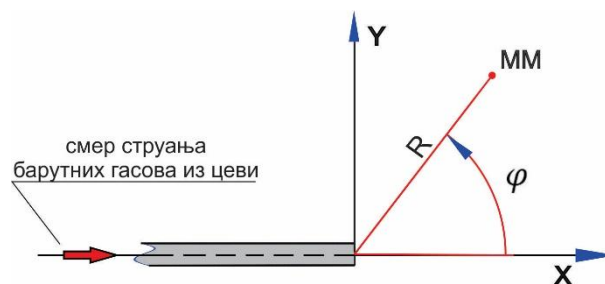
При чему су: (ω) маса барутног пуњења, (k) однос специфичних топлота $k = c_p/c_v$, (T_u) температура барутних гасова на устима цеви, (R_k) универзална гасна константа (обележена са индексом (k) да се не дуплира са ознаком растојања (R),

(β) коефицијент накнадног дејства барутних гасова и (v_o) почетна брзина пројектила.

Запремина коју заузимају гасови (W), на растојању (R) од уста цеви (Сл. 2.3а), до места за које се одређује вредност натпритиска, дата је једначином (2.2),

$$W = \frac{2}{3}\pi R^3 + \pi R^2 h \quad (2.2)$$

при чему је (h) висина ватрене линије.



Сл. 2.3а – Скица цеви оруђа са тачком у простору MM, за коју се врши прорачун

Тачка у простору за коју се врши прорачун натпритиска, дефинисана је растојањем (R) од уста цеви и углом који заклапа са осом цеви (φ).

Заменом (p_1) у једначину (2.1) добија се израз:

$$\Delta p = \frac{2}{k+1} (Q^2 - 1) p_u \frac{W_{kn}}{W} \quad (2.3)$$

при чему је (W_{kn}) запремина канала цеви.

Притисак на устима цеви се израчунава путем, $p_u = \frac{\omega R_k T_u}{W_{kn}}$.

Даљом заменом добија се:

$$\Delta p = \frac{2}{k+1} (Q^2 - 1) p_u \frac{W_{kn}}{\pi R^2 \left(\frac{2}{3}R + h\right)} \cdot \frac{1 + \cos^2 \frac{\varphi}{2}}{2} \quad (2.4)$$

При чему је (φ) угао који заклапа линија која пролази кроз уста цеви и место за које се одређује вредност натпритиска у односу на вертикалну раван гађања.

За оруђа са гасном кочницом једначина за натпритисак добија облик:

$$\Delta p = \frac{2}{k+1} (Q^2 - 1) p_u f(\sigma, \varphi, \psi, R)$$

При чему је помоћна функција $f(\sigma, \varphi, \psi, R)$, дата једначином:

$$f = \frac{W_{kn}}{\pi R^2 \left(\frac{2}{3}R+h\right)} \left[\frac{\sigma}{n_1} \left(1 + \cos^2 \frac{\varphi}{2}\right) + \frac{1-\sigma}{n_2} \left(1 + \cos^2 \frac{\varphi-\psi}{2}\right) \right] \quad (2.5)$$

где су нове величине: (ψ) угао истицања барутних гасова из гасне кочнице, у односу на правац гађања, (n_1, n_2) опитни коефицијенти, за које се може узети да су једнаки и да имају вредност 2 и (σ) коефицијент који дефинише количину гасова на излазу из отвора гасне кочнице.

Даљом заменом се добија једначина (2.6), односно (2.7).

$$\Delta p = \frac{1}{k+1} (Q^2 - 1) p_u \frac{W_{kn} \left(1 + \cos^2 \frac{\varphi}{2}\right)}{\pi R^2 \left(\frac{2}{3}R+h\right)} \quad (2.6)$$

$$\Delta p = \frac{(Q^2-1)}{k+1} p_u \frac{W_{kn}}{\pi R^2 \left(\frac{2}{3}R+h\right)} \left[\sigma \left(1 + \cos^2 \frac{\varphi}{2}\right) + (1 - \sigma) \left(1 + \cos^2 \frac{\varphi-\psi}{2}\right) \right] \quad (2.7)$$

Запремина канала цеви (W_{kn}) се израчунава путем једначине $W_{kn} = W_0 + SL_{uk}$, при чему су: (W_0) почетна запремина барутне коморе, (S) површина попречног пресека канала цеви и (L_{uk}) дужина канала цеви.

Коефицијент накнадног дејства барутних гасова (β), може да се израчунава на више начина. Неки од њих су дати у литератури [13] и [14] и исказани су емпиријским изразима:

$$\beta = 2K_1 \frac{a_0}{v_0} + 0,15 \quad [13],$$

при чему је $K_1 = \frac{1 + \frac{3-k}{4}k}{k(k+1)}$,

$$\beta = \frac{1300}{v_0} \quad [14],$$

$$\beta = \frac{1400}{v_0} + 0,15 \quad [14].$$

Један од начина рачунања коефицијента накнадног дејства барутних (β), дат је у литератури [15] путем израза:

$$\beta = c_k \frac{1}{v_0} \sqrt{p_u \frac{W_0 + SL_{uk}}{\omega}}$$

при чему је коефицијент c_k , дат у табели 2.1, у зависности од почетне брзине пројектила.

Табела 2.1 – Вредност коефицијента c_k

v_0 (m/s)	400	500	600	700	800	900	1000
c_k	1,672	1,652	1,638	1,633	1,622	1,617	1,613

2.2. Полазна унутрашњебалистичка разматрања

Да би се на најбољи начин сагледале сложене појаве које се дешавају приликом истицања барутних гасова у току процеса опаљења, неопходно је познавати иницијалне процесе који се изучавају у домену унутрашње балистике, а односе се на припаљивање и сагоревање барута и гасодинамичке процесе који их прате.

Унутрашња балистика представља једну од основних техничких области у техници наоружања, која проучава процесе и појаве, који се јављају у цеви оруђа при процесу опаљења метка, односно током припаљивања и сагоревања његовог барутног пуњења. Посебно се изучава карактер пораста брзине пројектила и промена притиска барутних гасова у цеви оруђа, од тренутка опаљења до изласка пројектила из цеви оруђа [14].

Опаљење метка је сложен термодинамички и гасодинамички процес, који се карактерише врло брзим, готово тренутним претварањем хемијске енергије барута у топлотну а затим и у кинетичку енергију барутних гасова. Ово проузрокује кретање пројектила, кроз водиште цеви и померање самог оруђа услед промене количине кретања. Тај процес се одвија при великим вредностима притиска, који достиже интензитет и до 3000 - 5000 bar и температура гасова при сагоревању од 2500 до 3700 K, односно при напуштању цеви оруђа од 1500 до 2000 K. Процес траје веома кратко, од неколико хиљадитих до неколико стотих делова секунде. Максималне брзине пројектила достижу вредност и до 1800 m/s, а максимална убрзања пројектила достижу вредност од 10.000 до 100.000 g.

Притисак барутних гасова, настао сагоревањем барутног пуњења, које је смештено у барутној комори, односно у простору између затварача и пројектила, дејствује на све стране барутне коморе. Резултат дејства притиска на пројектил јесте сила $S \cdot P_{pr}$, која је колинеарна са уздужном осом цеви оруђа, односно пројектила и која је усмерена у правцу кретања пројектила. Истовремено на дно цеви, односно на затварач, делује сила $S \cdot P_z$, у правцу супротном од кретања пројектила.

Овде су:

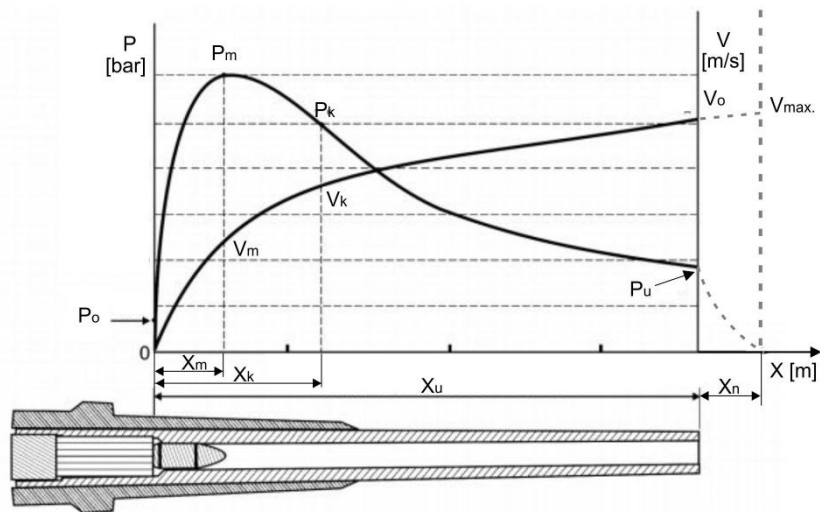
S - површина попречног пресека цеви,

P_{pr} - притисак који делује на дно пројектила и

P_z - притисак који делује на затварач.

При томе је притисак P_z , који делује на затварач већи од притиска P_{pr} , који делује на дно пројектила. Под дејством силе $S \cdot P_{pr}$ пројектил се убрзава, крећући се кроз цев оруђа и напушта је са почетном брзином V_0 , док сила притиска $S \cdot P_z$, делује на затварач и изазива кретање, односно трзање цеви и осталих делова лафета, који су сједињени са цеви у супротном правцу.

При сагоревању барутног пуњења у цеви притисак барутних гасова P и брзина V мењају се у функцији пређеног пута пројектила и времена по одређеним законима које можемо изразити функцијама. Карактер ових кривих притиска и брзине, код класичних оруђа [16], приказан је на сликама 2.4 и 2.5.



Сл. 2.4- Промена притиска барутних гасова и брзине пројектила у функцији пређеног пута

Сложени процес опаљења метка карактеришу следећи периоди:

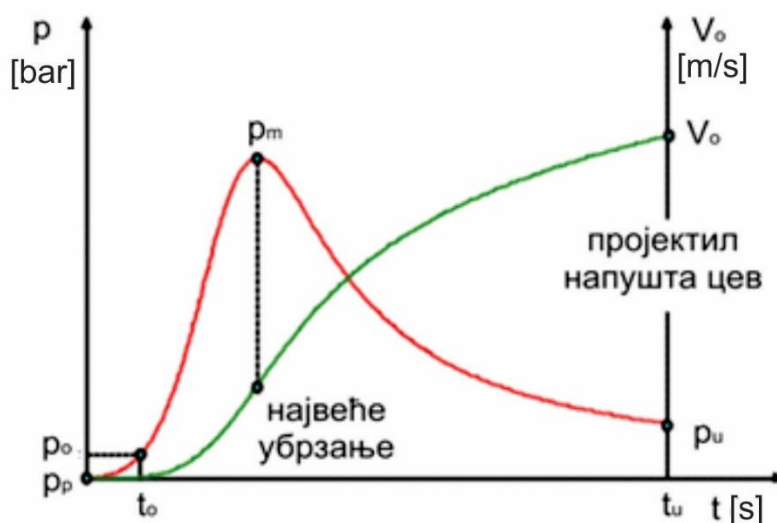
- претходни, од почетка горења барутног пуњења до почетка покретања пројектила,

- први или основни, од момента покретања пројектила до потпуног сагоревања барутног пуњења,
- други, после сагоревања барутног пуњења до изласка пројектила из цеви оруђа,
- трећи, период накнадног дејства барутних гасова, одмах по изласку пројектила из цеви.

Иницијација процеса опаљења започиње ударом ударне игле у капислу, при чему долази до паљења иницијалне каписле која садржи осетљиву фулминатску или азидну смешу, која пали припалу. Врели гасови припале, која је најчешће од црног барута и њене усијане честице излазе у комору, односно чауру. Ови гасови развијају у комори оруђа притисак од 20 до 50 bar, у зависности од јачине припале и овај притисак се назива притисак припале P_p .

Под дејством врелих гасова и честица припале долази до припаљивања барутног пуњења. У теоријском разматрању се узима да се припаљивање барута дешава тренутно, односно полази се од претпоставке да су се сва барутна зрна припалила истовремено, што није случај у пракси.

После припаљивања барутних зрна настаје процес сагоревања барутног пуњења. Пројектил мирује у свом основном положају све до тренутка, када се сагоревањем барутног пуњења ослободе гасови који развију притисак P_o , који се назива притисак форсирања. Величина притиска P_o , за различите калибре оруђа, може да буде од 150 до 550 bar, а зависи од материјала и конструкције водећег прстена, и геометрије водишта цеви, односно угла увијања жлебова. Од момента припаљивања барутног пуњења до тренутка покретања пројектила одиграва се пиростатички процес, који се назива претходним периодом. За њега је карактеристично да се процес сагоревања барута и развоја барутних гасова одвија у простору сталне запремине, без вршења икаквог механичког рада, јер пројектил, још увек, не врши кретање.



Сл. 2.5 - Промена притиска барутних гасова и брзине пројектила у функцији времена

На слици 2.5 претходном периоду горења барута одговара део криве $P_p - P_0$ и временски размак t_0 [16].

У следећем периоду, који називано првим или основним периодом, када је достигнут притисак потребан да савлада отпор усецању водећег прстена у жлебове, као и отпор тежине пројектила, почиње покретање пројектила из његовог основног положаја. До тада је сагорела мала количина барутног пуњења од 2 до 4% од укупне масе барутног пуњења. Барутна зрна и даље горе стварајући нове количине гасова. У почетку првог периода брзина пројектила је још мала, па је увећање запремине барутне коморе значајно мање од повећања запремина барутних гасова што за последицу има нагло повећање притиска барутних гасова и достизање максималне вредности притиска P_m . Пројектил до тренутка достизања притиска P_m , пређе пут X_m , којем одговара време t_m , од почетка кретања пројектила.

После остваривања максималног притиска P_m , довршава се сагоревање барута. Пред крај сагоревања пројектил има знатно убрзање и за собом ослобађа све већи простор. Повећање простора иза пројектила је нагло, а образовање нових количина гасова је сразмерно мало, због мале количине преосталог несагорелог барута. Као последица ове појаве и чињенице да гасови настављају да врше рад на

покретању пројектила, притисак почиње да опада. Убрзање такође опада, али не и брзина јер барутни гасови и даље експандирају потискујући пројектил.

Опадање притиска је незнатно и оно износи од 10 до 30% вредности P_m . Пројектил је до тада добио 80 - 90% од брзине којом ће напустити цев оруђа. На крају процеса сагоревања барута притисак достиже вредност P_k . Овом притиску одговара пут пројектила X_k , време t_k и брзина V_k . Завршетком сагоревања и остваривањем притиска P_k , завршава се први период, током кога гасови изврше највећи рад. У овом периоду долази до једновременог убрзања гасова и њиховог ширења, као и до покретања пројектила па је овај процес пиродинамички.

После завршетка процеса сагоревања барутног пуњења наступа други период. Не долази до стварања нових гасова, али они још увек имају високу температуру и велику унутрашњу енергију те и даље врше експанзију дајући пројектилу убрзање. Због ширења гасова долази до опадања притиска, а будући да они врше механички рад долази и до њиховог хлађења. Иако притисак и убрзање опадају брзина пројектила и даље расте. Пошто пројектил има велику брзину, пут до изласка из цеви, пређе за веома кратко време, па се може претпоставити да не долази до размене топлоте између барутних гасова и зидова цеви и овај период се може сматрати адијабатским ширењем гасова.

Други период се завршава у тренутку када дно пројектила напусти уста цеви. У овом периоду притисак опада од притиска на крају процеса сагоревања P_k до притиска на устима цеви P_u , при чему брзина пројектила стално расте од V_k до V_o . Брзину пројектила V_o , на устима цеви, називамо почетна брзина пројектила.

После изласка пројектила из цеви гасови истичу великом брзином за пројектилом и дејствују на дно пројектила саопштавајући му извесно убрзање. Због тога пројектил не добија највећу брзину V_m на устима, цеви него на растојању X_n од уста цеви, после чега под дејством силе отпора ваздуха брзина пројектила почиње опадати. Овај период се назива периодом накнадног дејства барутних гасова.

2.3. Гасодинамичке појаве при опаљењу из оруђа

2.3.1. Појаве на устима цеви

Процеси струјања и појаве у околини уста цеви почињу са покретањем пројектила, настављају се за време његовог кретања кроз цев и завршавају истицањем барутних гасова пошто је пројектил започео слободан лет [17]. Процесе и појаве карактерише формирање низа удараих таласа и појава пламена, уз ширење таласа натпритисака око оруђа. Према времену одвијања, појаве и процеси на устима цеви могу се поделити на три фазе:

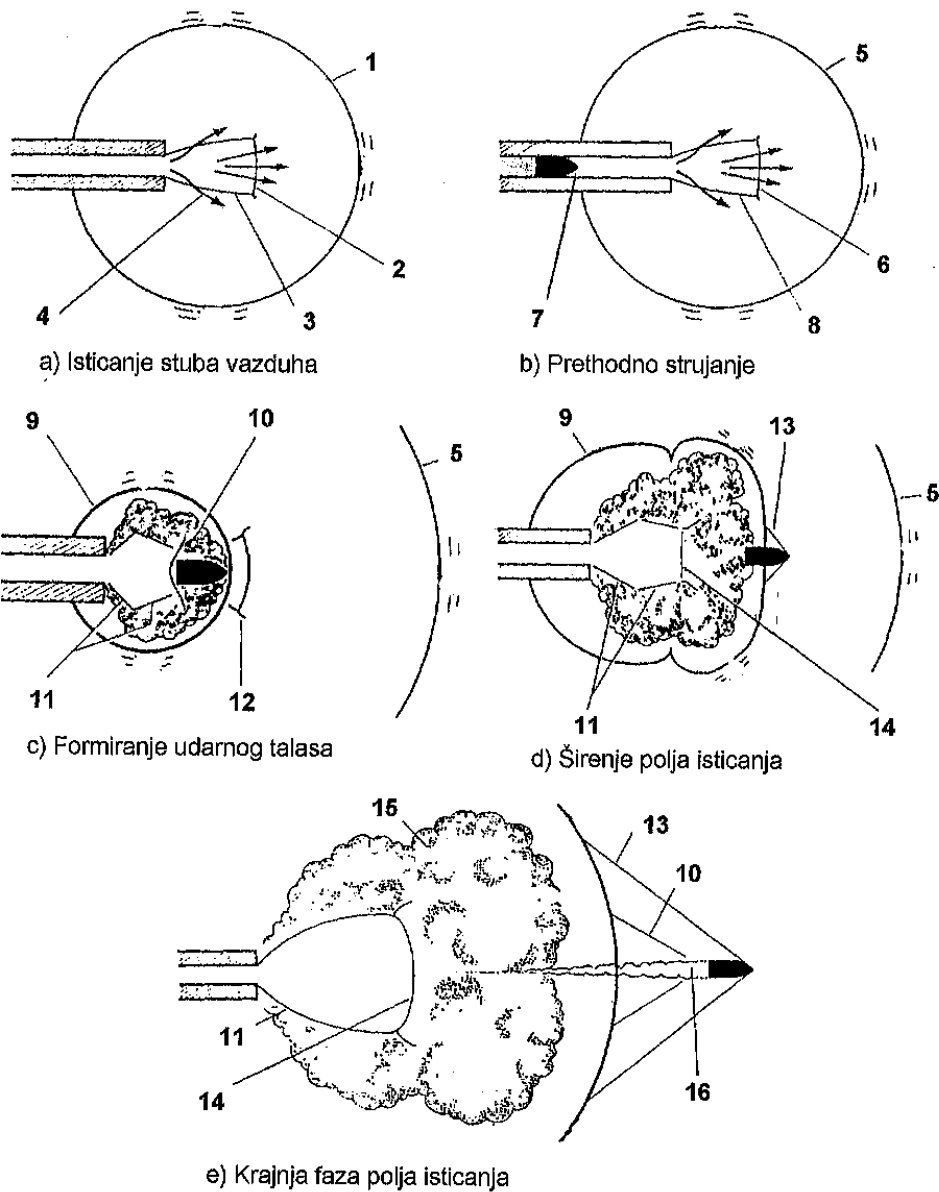
- почетна,
- међуфаза,
- фаза након престанка дејства поља притиска на пројектил.

Струјно поље у свакој фази карактерише низ ударних таласа и области које су шематски приказане на Сл. 2.6, [18].

У почетној фази из цеви прво истиче ваздух који испред себе сабија пројектил при свом кретању. То изазива разређење атмосфере у околини уста цеви. У оваквој атмосфери долази до мешања ваздуха и гасовитих продуката сагоревања барутних пуњења, који продиру испред пројектила кроз зазор између цеви и пројектила.

Међуфазу карактерише присуство пројектила у струјном пољу испред уста цеви оруђа и истицање кроз уста цеви главне количине барутних гасова у атмосферу формирану у почетној фази. Струјну слику усложњавају ударни таласи врха и дна пројектила.

При свом даљем кретању пројектил напушта струјно поље на устима цеви настало при истицању барутних гасова.



1 – ударни талас, 2 – махов диск, 3 – удар ваздуха из цеви, 4 – струјање ваздуха, 5 – претходни ударни талас, 6 – претходни Махов диск, 7 – продор барутних гасова, 8 – ударна област претходног истицања, 9 – ударни талас, 10 – ударни талас дна пројектила, 11 – ударна област настала истицањем барутних гасова после изласка пројектила из цеви, 12 – остаци Маховог диска претходног истицања, 13 – ударни талас врха Пројектила, 14 – Махов диск, 15 – мешање барутних гасова и ваздуха, 16 – вртложни траг дна пројектила

Сл. 2.6 – Фазе у појавама и процесима на устима цеви

Истраживања појава и процеса на устима цеви оруђа имају велики теоријски и практични значај јер омогућавају:

- одређивање карактера промене притиска на дно пројектила, пораст његове брзине и време дејства барутних гасова на пројектил;
- проучавање процеса формирања почетних услова кретања пројектила у ваздуху и њихов утицај на стабилност кретања пројектила и тачност и прецизност гађања;
- утврђивање механизма формирања и простирања таласа на устима цеви, што омогућава одређивање натпритисака око оруђа.
- истраживања процеса одвајања носача од језгра подкалибарних пројектила, што битно утиче на њихову прецизност;
- проучавање услова припаљивања барутних гасова при њиховом мешању са ваздухом, што одређује могућност појаве бљеска на устима цеви оруђа.

2.3.2. Притисак на дно пројектила

Када пројектил напусти цев оруђа, на њега још на извесном растојању настављају да делују барутни гасови, који истичу из цеви оруђа. Пошто је брзина барутних гасова већа од брзине пројектила, то се он под дејством барутних гасова додатно убрзава. Због тога пројектил добија највећу брзину на неком растојању од уста цеви. После тога барутни гасови престају да делују на пројектил и услед отпора ваздуха брзина пројектила почиње да се смањује [18].

На основу експерименталних резултата пређени пут пројектила у периоду накнадног дејства барутних гасова може се одредити из следеће везе:

$$\frac{l_p}{d} = (52 \div 90) \frac{\omega}{m_p} \quad (2.3.1)$$

где је l_p пређени пут пројектила у периоду накнадног дејства барутних гасова.

Промена притиска барутних гасова на дно пројектила у зависности од пређеног пута пројектила у периоду накнадног дејства и може се представити следећом аналитичком зависношћу:

$$p = p_{kr} \left(1 - \sqrt[3]{\frac{l}{l_p}}\right) = 0,5p_u \left(1 - \sqrt[3]{\frac{l}{l_p}}\right) \quad (2.3.2)$$

где је:

p_{kr} - критични притисак на устима цеви оруђа на почетку истицања;

l_p - пут пројектила на крају периода накнадног дејства барутних гасова;

l - текући пут пројектила.

Према формули (2.3.2) притисак на дно пројектила опада пропорционално трећем корену пређеног пута пројектила. Ово значи да је претпостављено да се гасови шире равномерно од уста цеви при чему образују сферу, Та претпоставка је нетачна, јер се гасови шире али у одређеном правцу.

Ако претпоставимо да струја истичућих барутних гасова има облик конуса, претходна формула добија облик:

$$p(l) = 0,5p_u \left(1 - \sqrt{\frac{l}{l_p}}\right) \quad (2.3.3)$$

На основу датих формула може се наћи средњи притисак за цео период накнадног дејства p_{sr} , као и прираст брзине пројектила Δv_0 . Тако имамо:

$$p_{sr} = \frac{1}{l_p} \int_0^{l_p} p(l) dl \quad p_{sr}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = p_{sr}(l_p)$$

$$p_{sr} = \frac{0,5p_u}{l_p} \int_0^{l_p} \left(1 - r\sqrt{\frac{l}{l_p}}\right) dl = \frac{0,5p_u}{l_p} \left(l_p - \frac{rl_p}{r+1}\right) = \frac{p_u}{2(r+1)} \quad (2.3.4)$$

$$\Delta v_0 = \frac{s}{m_p} p_{sr} \Delta t_p \quad (2.3.5)$$

За експонент $r=3$ добија се $p_{sr}/p_u=l/8=0.125$,

за експонент $r=2$ добија се $p_{sr}/p_u=l/6=0.167$.

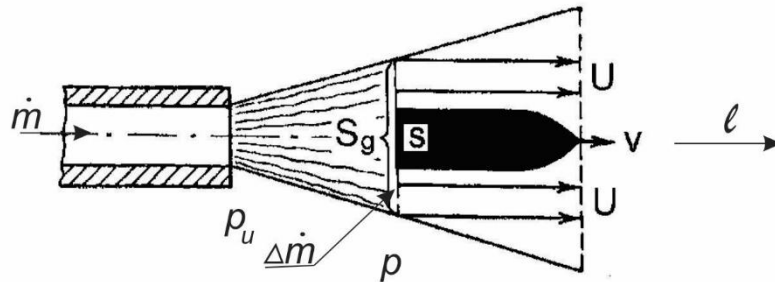
Опити, гађањем, су показали да је $p_{sr}/p_u=0.178$. Ово показује да струја гаса има коничан облик.

Пошто пројектил у периоду накнадног дејства мало мења своју брзину ($0.5 \div 2$ %), може се усвојити, да је:

$$\Delta t_p = l_p/v_u \quad (2.3.6)$$

$$\Delta v_0 = \frac{s}{m_p} \cdot \frac{p_{sr}}{p_u} p_u \frac{l_p}{v_u} = \frac{p_{sr}}{p_u} \cdot \frac{s}{m_p} \cdot \frac{p_u}{v_u} l_p \quad (2.3.7)$$

На бази опита, гађањем, може се одредити Δv_0 и прорачунати I_p . Притисак на дно пројектила може се одредити и на основу следећих претпоставки Сл. 2.7:



Сл. 2.7 – Изглед струјног поља у периоду накнадног дејства барутних гасова

1. Струја гаса у истичућем млазу има облик конуса.
2. По целом попречном пресеку конуса S_g , где се у датом тренутку налази дно пројектила, густина и средња брзина гасова U су једнаки.
3. На дно пројектила, односно површину S , делује средњи притисак гасова.
4. Присуство пројектила у струји не утиче на истицање гасова из цеви оруђа.
5. Притисак на пројектил зависи од релативне брзина $U-v$.

Уз претходне претпоставке из закона промене количине кретања, добијамо:

$$p = k_1 \frac{s}{S_g} \frac{\dot{m}}{s} (U - v) \quad (2.3.8)$$

Овде је \dot{m} масени проток гасова из цеви оруђа. Коефицијент k_1 узима у обзир механизам опструјавања пројектила барутним гасовима и одређује се на основу опита у аеродинамичком тунелу. За пројектил са равним дном је $k_1 = 0,7$. У претходној формули занемарена је статичка компонента реакције гаса, као и разлике брзина гаса у датом попречном пресеку конуса S_g . У циљу поправке коефицијента због неравномерности брзина гаса од осе струје ка периферији, уводи се допунски коефицијент $k_2 = 5/(1+4S/S_g)$ [18]. Овај коефицијент расте од 1 до 5 при кретању пројектила и порасту пресека струје гаса S_g . Због тога је:

$$p = k_1 \frac{5}{1+4\frac{S}{S_g}} \cdot \frac{s}{S_g} \cdot \frac{\dot{m}}{s} (U - v) \quad (2.3.9)$$

Процес истицања барутних гасова из канала цеви оруђа је веома кратак. У првом приближењу време истицања гасова из канала цеви, t_i , може се одредити помоћу формуле:

$$t_i = \frac{5l_{ka}}{v_u} = \frac{5}{b} \quad (2.3.10)$$

Овде је l_{ka} дужина канала цеви оруђа. Високи притисак барутних гасова и њихова брзина доводе до јаких поремећаја околне атмосфере. Брзина кретања и ширења струје барутних гасова у односу на атмосферу, неколико пута је већа од брзине распрострања звука у њој. Због тога се јављају ударни таласи у ваздуху, који се распростиру око оруђа брзином знатно већом од брзине звука. Сматраћемо да је формиран сферни ударни талас са радијусом R , као и да је његова рефлексија од земље врло слаба. У том случају, интензитет ударног таласа опада пропорционално R^3 , а интерференција ударног таласа са рефлектованим таласом од земље се може занемарити. Такође, усвајамо да је брзина истицања барутних гасова из канала цеви оруђа константна и једнака:

$$\frac{1}{\omega} \int_0^{t_i} R_t dt = \beta v_u \quad (2.3.11)$$

Овде је $R_t = Sp_u e^{-bt} + \dot{m}_u v_u e^{-2bt}$ - укупна реакција струје гаса на устима цеви.

При чему је коефицијент β , коефицијент накнадног дејства барутних гасова.

Ради лакшег разматрања процеса деловања ударног таласа, усвајамо да је фронт непокретан, а гас струји ка њему брзином простирања таласа у мирној атмосфери ($v_1 = \beta v_u$). Према теорији правог ударног таласа, пораст притиска кроз ударни талас износи:

$$\Delta p = \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right) p_1 = \frac{2k}{k+1} (M^2 - 1) p_1 \quad (2.3.12)$$

где је основни израз за промену притиска кроз прав ударни талас дат једначином:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2kM^2 - (k-1)}{k+1} \quad (2.3.13)$$

$$p_1 = \frac{\omega RT_1}{kW} \quad (2.3.14)$$

$$M = \frac{\beta v_u}{a} \quad (2.3.15)$$

У претходним једначинама је:

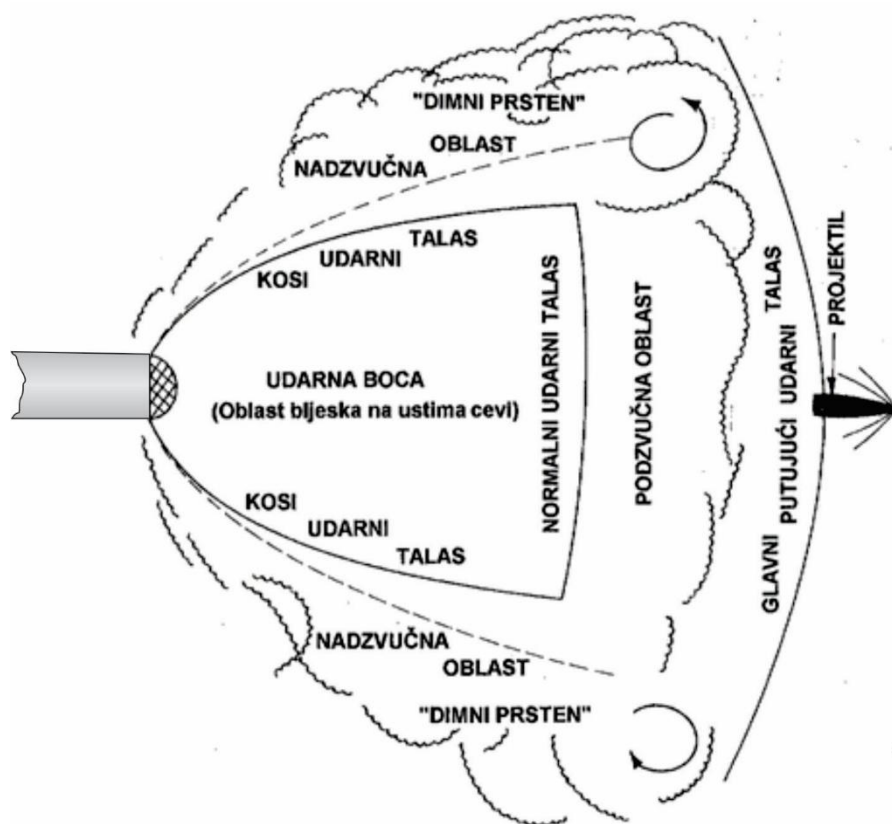
p_1 - статички притисак у струји

p_2 - притисак у фронту ударног таласа

a - брзина звука у ваздуху.

2.3.3. Бљесак на устима цеви оруђа

При изласку пројектила кроз уста цеви оруђа, долази до истицања барутних гасова из цеви оруђа. Ово истицање барутних гасова се назива ударно струјање на устима цеви. У стварности, ударно струјање обухвата одређен низ појава и процеса. То је уствари млаз кратког трајања који формирају врели барутни гасови високог притиска. Тај млаз пролази кроз низ стадијума при свом расту и нестајању. Описно, истицање барутних гасова на устима цеви карактерише низ нормалних и косих ударних таласа који формирају границе области у којој се одвија главна експанзија и хлађење гасова. Струјање у млазу је турбулентно, па се око ударних таласа формира такозвани "турбулентни омотач", а око њега се налази такозвани турбулентни "димни прстен". На Сл. 2.8 [18] је скица ударног струјања на устима цеви у тренутку када је пројектил прешао пут од 25 калибара од уста цеви. Скица показује карактеристике ударног струјања.



Сл. 2.8 – Ударно струјање на устима цеви оруђа

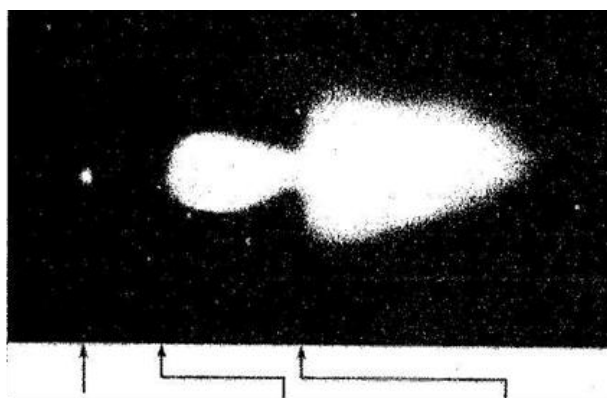
Главни путујући ударни талас се формира у ваздуху када истичући барутни гасови опструјавају пројектил и индукују низ слабих ударних таласа у релативно мирном ваздуху иза првог, али слабијег ударног таласа, индукованог пројектилом. Овај низ ударних таласа убрзо се стапа у јак ударни талас испред пројектила. У међувремену, пројектил у интерференцији са директним струјањем гасова, формира јак ударни талас иза себе. Овај ударни талас, на крају, постаје квазистационаран нормални ударни талас и са косим ударним таласима формира централну надзвучну област млаза, која се назива ударна боца. Струјање у боци почиње на устима цеви где је гас светао. Ова видљива светлост, која се простира на малом растојању од уста цеви, назива се примарни бљесак и може бити бела или црвена. Бела боја указује да се ту одвија сагоревање гасова, док црвена боја указује на присуство чврстих честица у зони примарног бљеска.

Основна експанзија млаза је ограничена на ударну боцу где је струјање, почињући на устима цеви са Маховим бројем блиском јединици, практично адијабатско. Пошто се гас креће до граница боце (ударних таласа), и Махов број и његова апсолутна брзина расту нагло уз одговарајући пад притиска, густине и температуре; температура је највећи део времена релативно ниска тако да гас престаје да емитује видљиву светлост. Када је светлост видљива, осветљеност испуњава ударну боцу, али се не шири ван ње. Ова светлост (област осветљености на устима цеви) је врло слаба и ретко се примећује. Струјне линије су праве и дивергирају од уста цеви као при струјању из тачкастог извора, а притисак и густина у свакој равни нормалној на осу цеви опадају униформно полазећи од осе ка периферији. У области непосредно иза косих ударних таласа, гас који је прешао ове таласе још има надзвучне брзине, а температуре су му пале испод температуре видљиве области.

С друге стране, гас који се креће напред кроз нормални ударни талас успорава се до подзвучних брзина, компримује се и услед тога му расте температура до температуре коју је он приближно имао на устима цеви. Ова температура је довољно висока да проузрокује међубљесак у облику конуса црвене или

црвенкастонаранџасте боје. Основа конуса је на нормалном ударном таласу. Иако није тако интензиван као секундаран бљесак, међубљесак даје довољно светлости за откривање положаја оруђа за време ноћних гађања.

Око слоја гасова надзвучне брзине налази се такозвани "турбулентни омотач" у коме се барутни гасови, који садрже велике количине водоника и угљен монооксида, мешају са околним ваздухом увученим у овај омотач. Ова смеша ваздуха и гаса назива се "димни прстен". То је област интензивног турбулентног струјања са вртлозима различитих величина, која се шири радијално и креће се напред док не нестане под дејством ваздушних струја или неке препреке. Овај прстен се може упалити и постати велики, волуминозни бљесак познат као секундарни бљесак, који је далеко најинтензивнији од свих врста бљесака. Уз одговарајућу смешу гаса и ваздуха, паљење може бити индуковано истим факторима одговорним за појаву међу пламена, тј. порастом притиска и температуре после проласка гасова кроз ударне таласе. Паљење може такође проузроковати предбљесак (видети слику 2.9), појава која није везана за ударно струјање на устима цеви, пошто претходи изласку пројектила из цеви орађа.

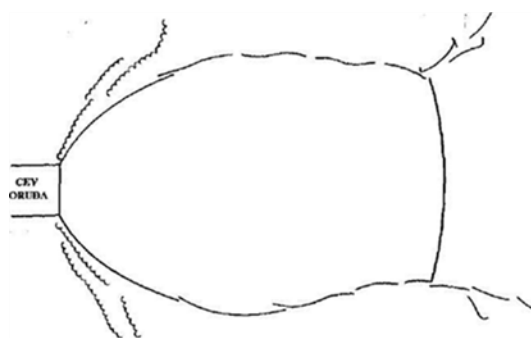


Примарни бљесак међубљесак регуларни предбљесак

Сл. 2.9 – Три врсте бљеска

Предбљесак је уствари сагоревање барутних гасова ниског притиска који су процурели испред пројектила док је он у цеви оруђа. Ако је цурење обимно, а сагоревање траје дуго, смеша гас-ваздух може пристићи предбљесак и запалити се. Овакво цурење гаса обично се јавља код истрошених цеви и не сматра се великим проблемом.

Бљесак је нуспродукт ударног струјања на устима цеви и без обзира на свој изглед и интензитет, не утиче знатно на развој млаза који се дели на два периода - раст и нестајање ударне боце. Раст боце се завршава када она достигне своју максималну запремину (видети Сл. 12.8). После тога боца пролази кроз две фазе. За време прве, нормални ударни талас остаје стационаран на око 15 калибара од уста цеви, док се попречни пресек боце смањује док она не постигне стационарне размере, при чему јој је облик сличан оном скицираном на слици 2.10. Друга фаза почиње после успостављања стационарних услова. Она доводи до сталног сужавања боце без битне промене њеног облика.



Сл. 2.10 – Стационарни облик ударне боце

Следећа појава везана за нестајање млаза има значајан утицај на откривање ватреног положаја. То је појава таласа разређења који се формира при изласку пројектила из цеви и креће се ка задњаку оруђа. Од задњака се одбија ка устима цеви и на крају се појављује у млазу. Док се то одиграва, нормални ударни талас се креће ка устима цеви. Фронтони ударног таласа и таласа разређења ће се срести негде испред уста цеви. Тада долази до појава сличних пуцању мембране која задржава компримовани гас у цеви. Притисак у ударном таласу пада и боца нестаје, чиме се завршавају појаве везане за ударно струјање на устима цеви.

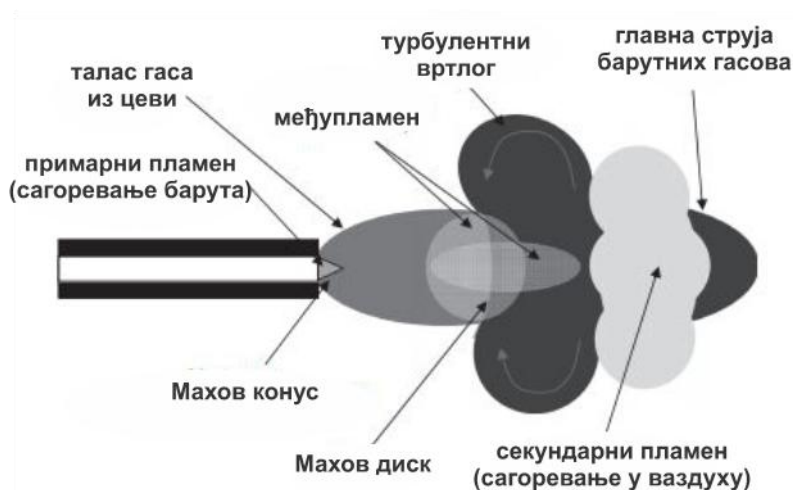
2.3.4. Ударни талас око оруђа

Приликом опаљења метка долази до истицања барутних гасова из цеви оруђа, што за последицу има појаву ударног таласа, који се јавља око оруђа. У зони појаве ударног таласа јавља се повећање притиска, које се посебно одражава на послугу

артиљеријских оруђа и пешадију која учествује у борбеним дејствима и налази се у непосредној пратњи самоходних оруђа.

У процесу пројектовања, конструисања и експлоатације артиљеријских оруђа потребно је познавања механизма настајања ударног таласа и свих пратећих појава које су узроковане наглим истицањем барутних гасова. Ове појаве прате процес опаљења и манифестују се у непосредној близини око оруђа.

Процес настајања ударног таласа започиње наглим сабијањем стуба ваздуха, који се налази у цеви оруђа, испред пројектила и његовим сусретом, односно ударањем у непомицни слој ваздуха око уста цеви. Истовремено из цеви истиче део барутних гасова, који уз стуб ваздуха, чине први ударни талас. При изласку пројектила из цеви ствара се други ударни талас који се успоставља услед интензивног истицања ослобођене струје барутних гасова. Ови гасови имају високу температуру и притисак и основни су узрочник генерисања ударних таласа око оруђа. Уколико оруђе има гасну кочницу, гасови који истичу кроз бочне отворе формирају посебне ударне таласе. Барутни гасови који формирају други ударни талас имају знатно већу температуру и притисак, у односу на околину, па се нагло шире и постају доминантни у односу на претходни талас који у потпуности поништавају прекривајући га наглом експанзијом (Сл. 2.11), [19].



Сл. 2.11 – Приказ појаве истицања барутних гасова из цеви оруђа

Током експанзије гасова слојеви теже да се рашире и сабијају наредне слојеве. То доводи до формирања и кретања фронта таласа с повећаним притиском, температуром и густином. За разлику од акустичких таласа, код ударних таласа долази до премештања флуидних делића у нови положај.

Фронт ударног таласа представља границу између непоремећене средине и поремећене средине коју карактерише стање повећане температуре, притиска и густине. Приликом истицања гасова код оруђа са гасним кочницама долази до формирања већег броја ударних таласа, који међусобно врше интеракцију, формирајући зоне са сниженим и повишеним притиском [15].

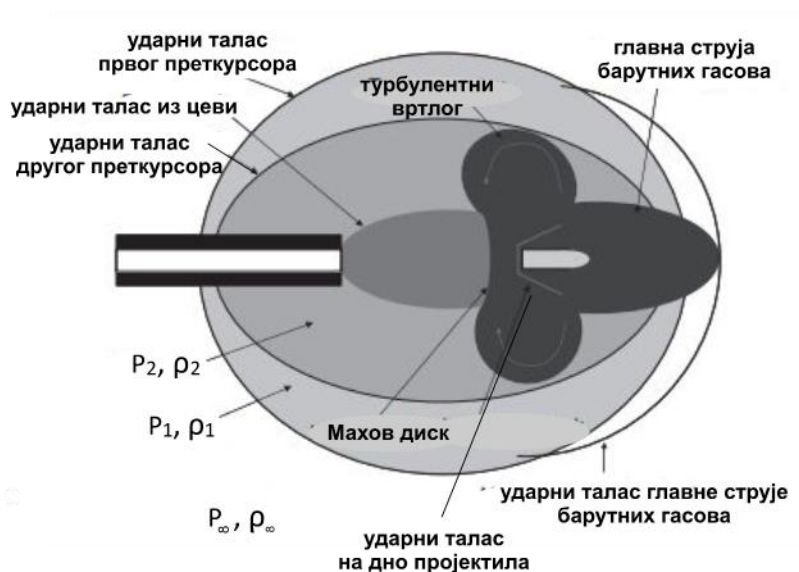
Приликом проласка пројектила кроз водиште цеви долази до мањег или већег трошења водећег прстена пројектила [20], због чега део гасова пролази између зидова цеви и водећег прстена, претходи изласку пројектила и врши сабијање ваздушног стуба у цеви оруђа.

Ова појава је посебно изражена код минобацача, где се примењује лавиринтско заптивање, односно између минобацачке мине и унутрашње површине цеви постоји зазор, а заптивање се врши преко више паралелних жљебова, који умањују ефекат проласка барутних гасова, пре изласка мине. Код новијих модела минобацачких мина постоји заптивни прстен који се под дејством барутних гасова помера унапред и ускаче у жлеб на калибарном делу кошуљице чиме се обезбеђује боље заптивање и умањује ефекат проласка барутних гасова [21].

Након изласка пројектила продукти сагоревања нагло истичу из цеви, а са њима и несагореле честице барута, које сагоревају у турбулентној струји, формирајући примарни део пламена.

Услед даље експанзије гасова, у цеви оруђа, долази до њиховог истицања из цеви. Део гасова, које карактерише повећан притисак и температура, пролази кроз ударни талас и у зони испред њега, формира међупламен. У зони око Маховог диска долази до турбулентног струјања гасова. Секундарни пламен настаје као последица реакције продуката сагоревања барута са околним ваздухом и њиховом

накнадном оксидацијом. Примарни фронт струјања се налази на врху струје гасова, која истиче из цеви и саосан је са њом и то је приказано на (Сл.2.12), [17].



Сл. 2.12 – Ширње фронта ударног таласа по изласку пројектила

2.3.5. Натпритисак око оруђа

Као последица појаве ударних таласа и интензивног истицања барутних гасова, приликом опаљења пројектила, јавља се поље повећаног притиска, смеше гасова, коју чине продукти сагоревања и околни ваздух. Ово поље се у основи карактерише натпритисак, просторна расподела и промена натпритиска током времена. Основне величине, при струјању гасова, које се прорачунавају и прате су: притисак, температура, густина и брзина струјања.

Приликом испитивања вучених и самоходних артиљеријских оруђа, врши се мерење натпритиска ударног таласа око оруђа. Мерења се врше са свим барутним пуњењима из муницијског комплета, са положајем цеви средина, лево и десно по правцу и при најмањој и највећој елевацији. Давачи притисака се постављају на карактеристичним местима, која одговарају позицији послужилаца током гађања: нишанџија, пунилац, први и други додавач и сл. Сонде су усмерене у смеру уста цеви, а позициониране су на висини која одговара положају главе при стојећем или чучећем ставу.

Поред тога мерења се врше на спољној страни кракова лафета, између кракова, на два метра лево и десно од осе цеви, у висини средњег ослонца оруђа на тло, на растојањима 10 m и 20 m, лево и десно од осе цеви, у висини уста цеви. Уколико оруђа имају заштитне штитове, мерење натпритиска се врши са спуштеним и подигнутим штитовима [15]. Ватрени положај се увек бира тако да се налази на отвореном земљаном терену, без препрека и зидова у близини, како не би дошло до интерференције ударних таласа. На самоходним оруђима и тенковима натпритисак се мери на местима посаде и оклопном телу, имајући у виду положај пешадије током борбених дејстава (Сл. 2.13.) [22].



Сл. 2.13 – Распоред мерне опреме у циљу мерења натпритиска око самоходног топа 120 mm

У зависности од добијених резултата даје се оцена о потреби допунске заштите послуге, препорученим положајима и њиховим позицијама током опаљења. Ако се средствима допунске заштите ефекти ударног таласа не могу свести на прихватљиву меру, неопходно је извршити реконструкцију гасне кочнице или извршити измену и реорганизацију барутног пуњења. Овај проблем се такође може јавити код минобацача, великог калибра и домета, тим пре што је захтевани положај послуге, у првом реду нишанције, непосредно уз оруђе. Проблем натпритиска је изражен и код ракетних бацача, како ручних, где је глава стрелца у положају непосредно уз лансер, тако и код вишецевних ракетних бацача, поготово

у случајевима рафалне паљбе. Овај проблем може бити додатно компликован и појавом повратног пламена, односно накнадног сагоревања несагорелих честица погонских пуњења.

Ударни талас на човека делује, непријатном појавом, која се пре свега манифестује, болом у ушима, због наглог пораста атмосферског притиска, при проласку фронта ударног таласа преко ушију. При високим вредностима натпритиска, већим од 0,55 bar, које су проузроковане јаким ударним таласима, код човека долази до оштећења периферног неуровегетативног система, нарушавања функције централног нервног система, кардиоваскуларних проблема и других оштећења организма.

Утицај натпритиска на човеков организам је различит, а највише зависи од интензитета и времена излагања. Његов утицај слаби са повећањем растојања, од места извора, а може се отклонити, у мањој или већој мери, применом заштитних средстава (антифони, шлемови, заштитни прслуци и др.).

Тегобе и оштећења организма [15] и [23] изазване овом појавом, могу бити различите и разврстане су према вредности натпритиска:

- од 0,1 bar до 0,15 bar, не осећају се тегобе, није потребна заштита ушију,
- од 0,2 bar до 0,3 bar, осећа се бол у ушима, потребна заштита приручним средствима (вата, капа, чепови за уши),
- од 0,35 bar до 0,45 bar, оштар бол у ушима, зујање, смањен слух после гађања; излагање овим натпритисцима је дозвољено само уз ношење опреме за заштиту слуха (антифони, шлемови),
- од 0,5 bar до 0,55 bar, осећа се удар по целом телу, највише у главу и груди, при дужем гађању јавља се физиолошки замор; неопходна је заштита слуха специјалном опремом; нису допуштени већи натпритисци од 0,55 bar,
- од 0,6 bar до 1,0 bar, није допуштен рад послузи, уз ношење посебних шлемова и заштитних прслука, могућа су краћа гађања,
- натпритисци већи од 1,0 bar, доводе до контузија организма и обавезне хоспитализације,
- натпритисци већи од 5,0 bar, смртоносни су за човека.

3. ТЕОРИЈСКА И НУМЕРИЧКА ПОСТАВКА ПРОБЛЕМА

3.1. Увод у теоријске основе нумеричке динамике флуида

Приступи који се користе при решавању проблема у механици флуида и преносу топлоте су теоријски, експериментални и нумерички.

У теоријском, односно аналитичком приступу, уводе се претпоставке којима се разматрани проблем упрошћава и уколико је могуће тражи решење у затвореном облику. Обично је овај метод ограничен на линеарне проблеме и једноставне геометрије, а решења су дата у облику формула. Експериментална испитивања дају најбоље резултате за многе проблеме струјања.

У нумеричкој динамици флуида (CFD) помоћу рачунара се решавају диференцијалне (локалне) или интегралне једначине које представљају физичко-математички модел разматране физичке појаве [24]. Иако је *Richardson* још 1910. године искористио методу коначних разлика за решавање *Laplasove* једначине [25], прави развој модерне CFD почиње 50-тих година прошлог века и у вези је са развојем и широком применом рачунара велике брзине и капацитета. У развоју CFD истакнуто место заузимају истраживања приказана у референцама [26-29]. Међу најзаступљеније методе у CFD спадају метода коначних разлика (FDM), метода коначних елемената (FEM), и метода коначних запремина (FVM). Прво су почеле да се користе FDM, које одликује једноставна формулација. За вишедимензионалне проблеме генерише се структурисана мрежа у две или три димензије. Код тела произвољног облика ова мрежа је закривљена и прво се трансформише у Декартове координате које се затим користе за формирање диференцијалних једначина. Потешкоће се јављају за Нојманов гранични услов дефинисан изводом у правцу нормале, који није могуће егзактно задовољити, већ само апроксимативно. У FEM [30-32] основни принципи и формулације захтевају строго математичко извођење. Са друге стране и за најсложеније геометрије није

потребно уводити трансформације координата већ се користе неструктурисане мреже које се релативно лако генеришу. Такође, Нојманов гранични услов је егзактно задовољен. У последње време све више се користи FVM [33] која је математички знатно једноставнија од FEM, а омогућује разматрање најсложенијих геометрија без трансформација координата, коришћењем неструктурисаних мрежа које имају могућност адаптације у зависности од добијених решења.

Ограничења CFD су двострука. С једне стране то су рачунарски ресурси који условљавају како сложеност физичко-математичког модела који ће се користити, тако и број елемената мреже у нумеричком домену. Са друге стране то је разумевање и математичко моделирање сложених физичких појава као што су турбуленција, сагоревање и сл. И поред овога CFD има своје значајне предности у односу на експериментална испитивања, које се не огледају само у неупоредиво нижим трошковима, већ и у томе што је за неке проблеме практично немогуће остварити експерименталне услове испитивања који у потпуности одговарају реалним. Резултати које даје CFD највише зависе од тога колико верно физичко-математички модел описује стварну појаву, а затим од густине мреже и реда тачности нумеричких шема које се користе. Идеја да се CFD користи као виртуелни експеримент, за сада није остварљива, односно у пракси она се допуњује у мањој или већој мери са теоријским и експерименталним приступом. Најбољи пример за ово налазимо у пројектовању и моделирању индустријских производа, где се CFD користи у прелиминарном дизајну, чиме се за кратко време и мала финансијска средства анализира више различитих варијанти.

3.2. Систем билансних једначина

За проучавање струјања флуида користе се следећи закони физике [34]:

- закон одржања масе (једначина континуитета),
- закон кретања – други Њутнов закон (Навије-Стоксове једначине) и
- закон одржања енергије.

За ове законе веома често се користи термин: једначине одржања или билансне једначине. У зависности од тога за какву контролну запремину се примењују наведене једначине, могу бити:

- интегралне или макроскопске једначине, ако важе за коначну контролну запремину и
- локалне једначине ако важе за елементарну запремину флуидног делића (тачку).

У сва три наведена закона јавља се производ густине флуида и материјалног извода неке физичке величине f , као $\rho Df/Dt = \dots$. У зависности од тога како се овај члан представља једначина може имати неконзервативан или конзервативан облик. Директном применом материјалног извода добија се неконзервативан облик:

$$\rho \frac{Df}{Dt} = \rho \frac{\partial f}{\partial t} + \rho(\vec{v}\nabla)f = \dots$$

док се његовом трансформацијом применом једначине континуитета добија конзервативни облик:

$$\rho \frac{Df}{Dt} = \rho \frac{\partial}{\partial t}(\rho f) + \text{div}(\rho f \vec{v}) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho f) + \nabla \cdot (\rho f \vec{v})$$

Неконзервативна форма билансних једначина за струјање стишљивог вискозног флуида, дата у зависности од променљивих ρ , v_i , p , и T , има облик [24]:

једначина континуитета

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho v_i)_{,i} = 0 \quad (3.1.a)$$

једначина промене количине кретања

$$\rho \frac{\partial v_j}{\partial t} + \rho v_i \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} - \rho F_j = 0 \quad (3.1.б)$$

једначина енергије

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho v_i \frac{\partial e}{\partial x_i} + p \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - \tau_{ij} \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} - \rho r = 0 \quad (3.1.в)$$

Једначина стања

$$p = \rho R t \quad (3.1.g)$$

где је ρ густина флуида, v_i компоненте вектора брзине, унутрашња енергија по јединици масе, F_i компоненте вектора запреминских сила, p притисак, τ_{ij} тензор вискозних напона ($\tau_{ij} = 2\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$), T температура, q_i топлотни флуks и r доведена топлота по јединици масе.

Систем билансних једначина (3.1a-в) решава се коришћењем почетних и граничних услова, који су дати у поглављу 4.4. Систем једначина: континуитета, Навије-Стоксове и енергије, (3.1a-в), може бити написан у генерализованој конзервативној форми [24]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \frac{\partial G_i}{\partial x_i} = B \quad (3.2)$$

Овај систем једначина се негде назива и конзервативна форма система Навије-Стоксових једначина (CNS), где су: U вектор тзв. "конзервативних" променљивих, F_i променљиве конвективног флуksа, G_i променљиве дифузионог флуksа, а B су извори количине кретања и енергије, и све ове величине су дате као

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho v_j \\ \rho E \end{bmatrix}, \quad F_i = \begin{bmatrix} \rho v_i \\ \rho v_i v_j + p \delta_{ij} \\ \rho E v_i + p v_i \end{bmatrix}, \quad G_i = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{ij} \\ -\tau_{ij} + q_i \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho F_j \\ \rho F_j v_j \end{bmatrix} \quad (3.2a)$$

Са E је означена тотална енергија која представља збир унутрашње и кинетичке енергије

$$E = e + \frac{1}{2} v_j v_j \quad (3.3)$$

из које се посредством једначине стања идеалног гаса добија апсолутни притисак

$$p = (k - 1) \rho \left(E - \frac{1}{2} v_j v_j \right) \quad (3.4)$$

и температура

$$T = \frac{1}{c_v} \left(E - \frac{1}{2} v_j v_j \right) \quad (3.5)$$

У горњим једначинама k је однос специфичних топлота при константном притиску и константној запремини, док је c_v специфична топлота при константној запремини. Ако се занемари дифузиони флуks G_i ($\tau_{ij} = 0$), систем билансних једначина се упрошћава и дају Ојлерове једначине (ОЈ), које не могу да обухвате ефекте вискозности флуида.

Интеграљењем једначине (3.2) по запремини разматраног домена V , ограниченог контролном површином A , добија се:

$$\int_V \left(\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \frac{\partial G_i}{\partial x_i} - B \right) dV = 0 \quad (3.6)$$

а претварањем запреминског интеграла по флуksевима у површински интеграл помоћу Грин-Гаусове теореме добијена је форма позната као контролна запремина-површина (CVS)

$$\int_V \left(\frac{\partial U}{\partial t} - B \right) dV + \int_A (F_i + G_i) n_i dA = 0 \quad (3.7)$$

Површински интеграл у јед. (3.7) обухвата конвективне и дифузиони флуksеве кроз контролну површину A , а који су у равнотежи са нестационарним променама променљивих и изворима унутар контролне запремине. Овај површински интеграл је у самој основи FVM. Ова форма такође омогућује одговарајуће нумеричке шеме за моделирање струјања са великим градијентима или ударним таласима [35].

Генерално, нумеричке шеме зависе од физичко-математичког модела, односно типа једначина којима је одређена физичка појава описана, али и од форме тих једначина. Једначине у неконзервативној форми су погодне када примитивне променљиве ρ , v_i , p , T треба одредити директно, што није могуће код CNS и CVS форме (CVS је контролна запремина/површина), где променљиве представљају неке комбинације основних променљивих. Код ових других прво се израчунавају конзервативне променљиве, а тек онда се на индиректан начин одређују примитивне променљиве. Међутим и поред овога CNS и CVS форма има предности у многим CFD проблемима, као што је на пример одређивање густине код ударних таласа, где је налажење решења помоћу неконзервативне форме тешко. Међутим јединични масени флуks ρv_i као и флуksеви осталих величина који се користе код

CNS и CVS форме, су глатке функције, и омогућују да се добију дисконтинуална решења примитивних променљивих. Зато се најчешће неконзервативна форма користи када у струјању нема дисконтинуитета, као у случају нестишљивог флуида, док се CNS и CVS користе за стишљива струјања у којима могу да се појаве дисконтинуитети.

Треба напоменути да је само једначина промене количине кретања (3.1.б) Навије-Стоксова једначина, мада се понекад и систем билансних једначина, који обухвата јед. (3.1.а) до (3.1.в), назива систем Навије-Стоксових једначина (NSJ). Овај систем једначина се може модификовати или упростити у разне форме у зависности од разматране физичке појаве и ту спадају стишљиво струјање вискозног флуида, стишљиво струјање невискозног флуида, где су занемарени дифузиони чланови, нестишљиво вискозно струјање, код кога су временске и просторне промене густине занемарене, нестишљиво невискозно струјање, код кога су и дифузиони чланови и промене густине занемарени, вртложна струјања описана вртложношћу и струјном функцијом, струјања са сагоревањем и хемијским реакцијама, вишефазна струјања, турбулентна струјања, струјања са комбинованим преносом топлоте, акустика итд.

3.3. Метода коначних запремина

Методе коначних запремина се често називају и методама контролних запремина, а формулисане су полазећи од унутрашњег производа јединичне функције I са парцијалним диференцијалним једначинама које описују проблем. Резултат је запреминска интеграција разматраних парцијалних диференцијалних једначина. Најважнија својства FVM је њихова применљивост код неструктурисаних мрежа и лака примена Нојмановог граничног услова.

Нека је систем билансних једначина дат у конзервативној форми:

$$R = \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \frac{\partial G_i}{\partial x_i} - B \quad (3.8)$$

Овде је:

- U - вектор конзервативних величина по јединици запремине
- F - вектор конвективног флукса
- G - вектор дисипативног флукса
- R - резидуал (остатак)
- B - извори (маса, количине кретања и енергије)

Једначине коначних запремина добијају се полазећи од

$$(I, R) = \int_V R dV = \int_V \left(\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \frac{\partial G_i}{\partial x_i} - B \right) dV = 0 \quad (3.9)$$

где је:

- I - јединична функција, која је непрекидна унутар нумеричког домена и омогућује парцијалну интеграцију тако да се изводи вектора конвективног и дисипативног флукса могу изразити преко површинског интеграла
- V - запремински домен (запремина у 3D, односно затворена површина у 2D)
- A - граница домена (у 2D је затворена линија, а у 3D је затворена површина)

или

$$\int_V \left(\frac{\partial U}{\partial t} - B \right) dV + \int_A (F_i + G_i) n_i dA = 0 \quad (3.10)$$

где n_i означава компоненте јединичног вектора нормале на граничну површину. Дискретизација јед. (3.10) и сабирање по свим елементима унутар контролне запремине (CV) и на контролној површини (CS), даје

$$\sum_{CV} \left(\frac{\Delta U}{\Delta t} - B \right) \Delta V + \sum_{CS} (F_i + G_i) n_i \Delta A = 0 \quad (3.11)$$

односно

$$\sum_{CV} (\Delta U - \Delta t B) \Delta V + \sum_{CS} \Delta t (F_i + G_i) n_i \Delta A = 0 \quad (3.12)$$

Формулација дата једначином (3.12) показује да је промена величине ΔU на коју су додати извори, за временски интервал Δt , једнака збиру флуксева који се размене са суседним елементима. Једначина (3.12) представља систем алгебарских једначина за дискретизовану контролну запремину и контролну површину и представља општу формулацију FVM, с тим што постоје различите могућности за избор облика контролних запремина (ћелија, елемената) мреже и израчунавање

флуксева на страницама тих елемената. Закони одржања су примењени егзактно и у дискретној форми, пошто количина неке очуване величине која излази из једног елемента контролне запремине, директно улази у суседни елемент, кроз заједничку површину. То значи да нема вештачког стварања или нестајања очуване величине. Метода коначних запремина је такође ефикасна са аспекта рачунарског времена и једноставности алгоритма, јер прорачун флуksа кроз заједничку страницу за два елемента треба извршити само једном, пошто је вредност иста за оба елемента, а вредност флуksа се разликује само по знаку у зависности да ли флуид улази или излази из елемента.

Постоје два типа формулације FVM. Код првог типа се вредности променљивих срачунавају у чворовима елемената, а код другог у једној тачки унутар сваког елемента. У случају анализираном у овом раду, примењен је други тип, где се за тачку (центроид) унутар контролне запремине, израчунава средња вредност ΔU . За илустрацију се разматрају Ојлерове једначине за дводимензијско струјање, дате у облику

$$\frac{\partial U}{\partial t} = - \left(\frac{\partial F_1}{\partial x} + \frac{\partial F_2}{\partial y} \right) \quad (3.13)$$

где је:

U - вектор конзервативних величина

F_1 - конзервативни флуks у X - правцу

F_2 - конзервативни флуks у Y - правцу

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \end{bmatrix} \quad F_1 = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho u v \\ \rho E u + p u \end{bmatrix} \quad F_2 = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v u \\ \rho v^2 + p \\ \rho E v + p v \end{bmatrix}$$

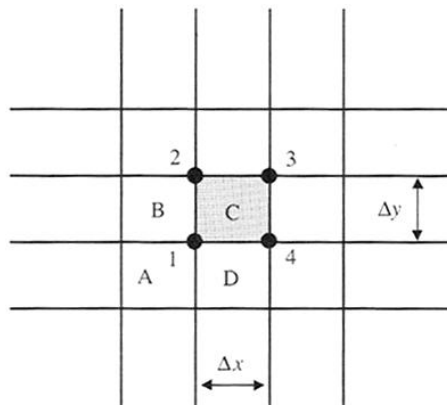
односно,

$$\begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} - \text{ маса по јединици запремине} \\ - \text{ флуks масе у X-правцу по јединици запремине} \\ - \text{ флуks масе у Y-правцу по јединици запремине} \\ - \text{ тотална енергија по јединици запремине} \end{array}$$

$$\begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho Eu + pu \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} - \text{ флукс масе у Х-правцу по јединици запремине} \\ - \text{ флукс Х количине кретања у Х-правцу} \\ - \text{ флукс Y количине кретања у Х-правцу} \\ - \text{ флукс тоталне енергије и снага силе притиска у Х-правцу} \end{array}$$

$$\begin{bmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ \rho Ev + pv \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} - \text{ флукс масе у Y –правцу по јединици запремине} \\ - \text{ флукс Х количине кретања у Y-правцу} \\ - \text{ флукс Y количине кретања у Y-правцу} \\ - \text{ флукс тоталне енергије и снага силе притиска у Y-правцу} \end{array}$$

На слици 3.1 приказана је контролна запремина ΔV , елемента C, у временском интервалу Δt којој одговара вредност вектора конзервативних величина U_C .



Сл. 3.1 - Шема коначних запремина са вредностима центрираним у ћелији

Просторна и временска дискретизација NSJ даје систем алгебарских једначина.

3.4. Нумеричке мреже

Генерисање нумеричке мреже је нераздвојиви део CFD и у великој мери је независан од солвера за одређивање струјног поља. Тек је аутоматско генерисање мреже омогућило примену CFD за проблеме на великим скалама у ваздухопловству, метеорологији, индустрији итд. Без тога и најтачније нумеричке шеме не би могле бити искоришћене у пуној мери.

Постоје два типа мрежа: структурисане и неструктурисане. Код структурисаних мрежа, све линије мреже су оријентисане правилно у два или три правца, тако да координатне трансформације дају квадрат или коцку. Код неструктурисаних мрежа нема ове правилности, и проблем се са глобалног своди на локални, а софтвер за генерисање мреже је неупоредиво компликованији. У анализи су коришћене неструктурисане мреже које пружају могућност адаптације, односно повећања броја елемената на месту ударног таласа.

3.4.1. Неструктурисане мреже

Генерисање структурисаних мрежа је ограничено на геометрије код којих се физички домен може трансформисати у нумерички домен једнозначним пресликавањем. За сложене и неправилне геометрије, оваква пресликавања су или изузетно компликована, или су неизводљива. У том случају се користе неструктурисане мреже код којих нема потребе за трансформацијом из физичког у нумерички домен, већ се методе коначних запремина и коначних елемената директно примењују на сваки од елемената мреже, с обзиром да су основне једначине одржања за ове методе написане у интегралној форми. Код неструктурисаних мрежа основни елемент је троугао за дводимензионалне, и тетраедар за тродимензионалне геометрије, а проблем генерисања неструктурисане мреже око разматране конфигурације своди се на покривање целог нумеричког домена скупом троуглова, односно тетраедара који се не преклапају.

Поред могућности за описивање најсложенијих конфигурација са минималним интервенцијама корисника, неструктурисане мреже су знатно робустније и пружају могућност за адаптивно меширање, па се чак и структурисане мреже које су почетно генерисане око правилних геометрија, претварају у неструктурисане мреже у циљу адаптивног меширања. Насупрот овим предностима су захтеви за додатним информацијама о повезаности мреже, што због индиректног адресирања повећава захтеве за меморијом и процесорским временом.

3.5. Закључак о нумеричком моделирању у динамици флуида

Иако се данас CFD користи као стандардни алат, нарочито у прелиминарним фазама пројектовања, треба имати у виду неколико важних елемената. Прво, мора се имати довољно добар увид у физикалност појаве због избора адекватног физичко-математичког модела, описаног са парцијалним диференцијалним једначинама (PDI) или датог у интегралној форми. Друго, морају се познавати сва ограничења нумеричког модела који се примењује, а који представља нумеричку дискретизацију физичко-математичког модела. Ово нарочито долази до изражаја у моделирању турбуленције, сагоревања и вишефазних струјања. Такође, један од најважнијих аспеката је резолуција нумеричке мреже, која мора да буде одговарајућа за разматрани проблем. У самом нумеричком моделу суштински је важно да гранични услови буду тачно постављени, а морају се знати и импликације нумеричких шема различитог реда тачности. На крају долази пажљива анализа и тумачење резултата, јер се у пракси понекад дешава да тачнији физичко-математички модели дају лошије слагање са експериментом у поређењу са мање тачним. За решавање физичко-математичког модела у овоме раду је коришћен софтвер ANSYS FLUENT.

3.6. Параметри у софтверу ANSYS FLUENT

У софтверу ANSYS FLUENT користи се метода коначних запремина за просторну дискретизацију, односно нумерички домен се дели на тетраедре у 3D и троуглове у 2D, а затим се врши интеграција једначина одржања масе, количине кретања и енергије, као и допунских једначина које се односе на турбуленцију. Вредности зависних променљивих (брзина, притисак, температура, густина, концентрација итд.) израчунавају се у центрима нумеричких ћелија, које потпуно испуњавају нумерички домен у коме се одређују величине поља. Чланови који описују конвекцију и дифузију у систему парцијалних диференцијалних једначина, представљају флуксеве, па морају да се одреде на границама ћелије. На тај начин се добијају алгебарске једначине за дискретне вредности зависних променљивих.

Дискретизација основних једначина одржања биће илустрована на примеру једначине одржања у стационарном струјању, која описује транспорт скаларне величине ϕ , која може бити: густина, компоненте брзине, температура или притисак. У интегралном облику за произвољну запремину V , ова једначина биће

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_{\phi} dV \quad (3.14)$$

где је:

ρ - густина флуида

\vec{v} - вектор брзине флуида

\vec{A} - вектор површине усмерен изван запремине V

Γ_{ϕ} - коефицијент дифузије за величину ϕ

$\nabla \phi$ - градијент величине ϕ

S_{ϕ} - извори величине ϕ (по јединици запремине)

Једначина (3.14) се примењује за сваку контролну запремину, односно ћелију у мрежи која потпуно испуњава нумерички домен. На слици 3.2 приказана је ћелија - троугаони елемент, која представља пример контролне запремине за дводимензионално струјање. Дискретизација горње интегралне једначине за дату ћелију даје

$$\sum_f^{N_{fac}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{fac}} \Gamma_{\phi} (\nabla \phi)_n \cdot \vec{A}_f + S_{\phi} V$$

где је:

N_{fac} - број страница елемента (у овом случају 3)

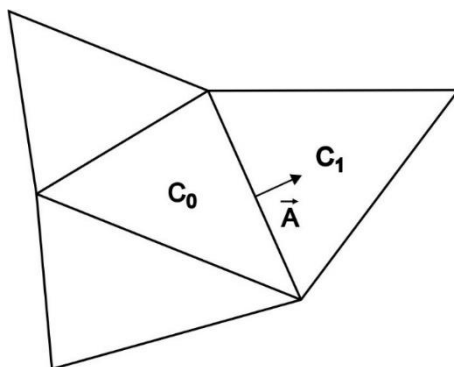
ϕ_f - величина ϕ која се транспортује кроз страницу f

$\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ - масени флуks кроз страницу f

$\vec{A}_f = A_f \vec{n}_f$ - A_f површина странице f и \vec{n}_f вектор у правцу нормале на страницу f

$(\nabla \phi)_n$ - пројекција градијента величине ϕ у правцу нормале на страницу

V - запремина елемента



Сл. 3.2 - Контролна запремина за дводимензионално струјање

Једначине које се решавају у коришћеном софтверу имају исти облик као што је горе дат и примењују се на тродимензијска струјања у нумеричком домену састављеном од произвољних полиедара (тетраедри, призме итд).

Вредности скаларне величине ϕ смештају се у тежиштима ћелија (тачке C_0 и C_1) док су вредности ϕ_f за конвективни члан потребне на страницама, па је потребно извршити интерполацију користећи вредности у тежиштима. Ово се врши узимањем вредности у ћелијама које се налазе уз струју, у односу на нормалну брзину v_n , која представља компоненту брзине струјања у правцу нормале на страницу. На овај начин се ради за конвективни члан, док се за члан који обухвата дифузију користе централне разлике, односно вредности у ћелијама и уз и низ струју.

Следећа два корака су различита код наведених солвера, а састоје се у линеаризацији дискретизованих једначина, и решавању резултујућег система линеарних једначина, да би се добиле кориговане вредности зависних променљивих.

Дискретизована транспортна једначина садржи непознату вредност скаларне променљиве ϕ у тежишту ћелије, као и у тежиштима суседних ћелија. Ова једначина у општем случају је нелинеарна по променљивој ϕ , па се линеаризација врши на следећи начин:

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b$$

где је:

a_p - линеаризовани коефицијент за променљиву ϕ у центроиду елемента c_0

a_{nb} - линеаризовани коефицијенти за променљиву ϕ , у суседним ћелијама елемента c_0

b - слободни члан

Индекс P односи се на ћелију c_0 , а индекс nb на суседне ћелије. Број суседних ћелија зависи од топологије мреже, али је у општем случају једнак броју страница ћелије c_0 . Сличне једначине могу да се напишу за сваку ћелију у мрежи, па се добија систем алгебарских једначина, са матрицом у којој је највећи број коефицијената једнак нули (ретка матрица), јер су вредности сваког елемента повезане само са вредностима елемената у непосредној околини, што горња једначина и показује. При решавању овог система потребно је контролисати промену величине ϕ . Ово се ради користећи факторе релаксације који редукују промену величине ϕ у свакој итерацији, односно биће:

$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta \phi$$

При чему је: ϕ нова вредност, ϕ_{old} стара вредност, $\Delta \phi$ израчуната промена, а α фактор релаксације који је увек мањи од 1.

У сегрегованом солверу, једначине одржања добијене нумеричком дискретизацијом парцијалних диференцијалних једначина, решавају се једна за другом, док се код спрегнутог солвера једначине одржања решавају истовремено. У раду је коришћен спрегнути солвер који даје стабилан прорачун за струјање стишљивог флуида у коме се јављају ударни таласи.

У случају нестационарног струјања, јавља се члан који представља временску промену конзервативне величине (маса, количина кретања, енергија) унутар сваке ћелије нумеричког домена. Један од начина за његово решавање је да се сведе на систем обичних диференцијалних једначина по времену, за чије решавање се

најчешће употребљавају методе Рунге-Кута, што је коришћено у изложеној анализи која обухвата нестационарно кретање ударног таласа.

За техничке примене турбулентна струјања се решавају применом неког од модела турбуленције, чије се једначине [34] додају Навије-Стоксовим једначинама усредњеним по времену (RANS). На тај начин затвара се систем парцијалних диференцијалних једначина које описују законе одржања и једначину стања идеалног гаса. Коришћени софтвер има уграђене различите моделе турбуленције, а овде је коришћен k - ϵ модел, који са две парцијалне диференцијалне једначине описује транспорт кинетичке енергије турбуленције (k), и дисипације турбуленције (ϵ) услед рада вискозних сила, односно вискозне дисипације, која се претвара у топлоту. Ове допунске једначине гласе:

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \bar{U}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{c_\mu k^2}{\sigma_k \epsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \frac{c_\mu k^2}{\epsilon} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} - \epsilon$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \bar{U}_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{c_\mu k^2}{\sigma_\epsilon \epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + c_{\epsilon_1} c_\mu k \left(\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} - c_{\epsilon_2} \frac{\epsilon^2}{k}$$

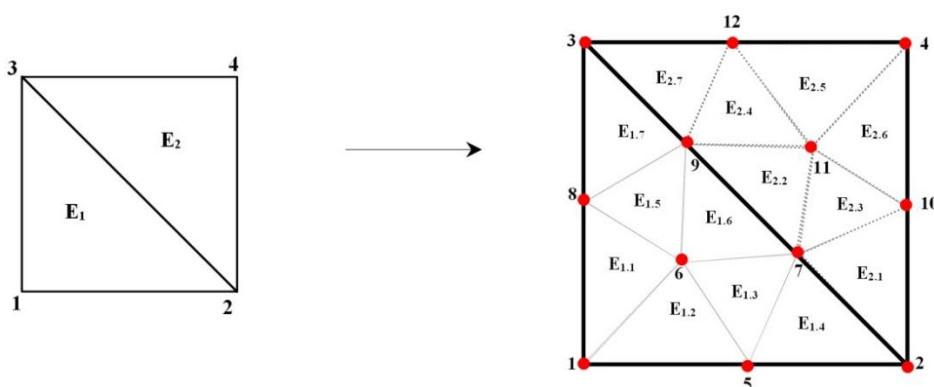
Где коефицијенти дати у овим једначинама, у коришћеном софтверу ANSYS FLUENT, имају следеће вредности [35]: $c_\mu = 0,09$, $c_{\epsilon_1} = 1,44$ и $c_{\epsilon_2} = 1,92$.

3.7. Адаптивне мреже

Од раније је познато да мрежа одређена независно од решења струјног поља није поуздана за одређивање свих карактеристика струјања. У одређеним деловима струјног поља јављају се велики градијенти променљивих. Решења Ојлерових једначина изискују тачно одређивање положаја, односно хватање ударног таласа, као и одређивање вртлога који могу да проистекну са оштрих ивица тродимензионалних конфигурација. Увођењем нумеричког прорачуна Навије-Стоксових једначина постало је потребно да се обезбеди фина мрежа у областима вртложног трага и отцепљеног струјања. Из тог разлога је потребно прецизно идентификовање ударних таласа и разлагање вртлога који могу настати из

тродимензионалних прорачуна 3D струјања. Јасно је да није могуће, априори, добити довољно фину мрежу без увођења неприхватљиво великог број тачака у струјном пољу. Употреба адаптивне мреже, која се развија са решењем струјног поља, је стога неизбежан захтев [36].

Способност адаптивног генерисања мрежа постала је саставни део свих кодова за прорачун 3D струјања. На доњој слици је дат пример како се увођењем додатних тачака, од грубе мреже са 2 троугла добија fina мрежа са 14 троуглова.



Сл. 3.3 - Умножавања троугластог елемента мреже

3.7.1. Прерасподела мреже

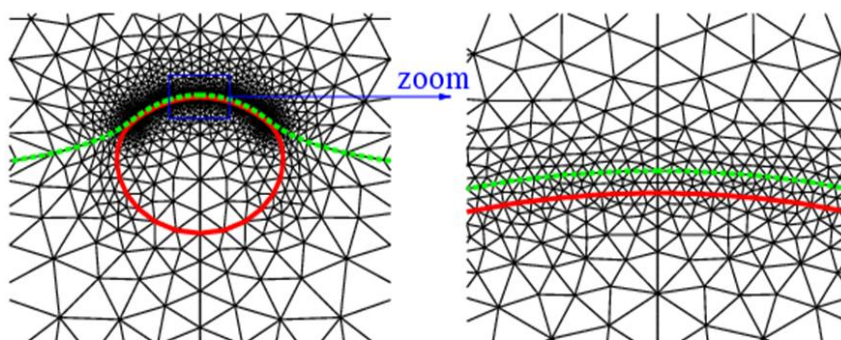
Опција која је рано привукла пажњу била је употреба прерасподеле мреже у циљу постизања захтеване густине тачака мреже. Разматрана су растезања мреже у једном правцу, која нагомилавају линије мреже, као и растезања у више праваца. У оквиру метода нумеричког генерисања мрежа, могуће је повезати чланове који нагомилавају и разређују линије мреже, при чему ће мера бити грешка апроксимације или промена променљивих струјања.

Заједнички недостатак свих метода заснованих на прерасподели мрежа је потреба да се осигура да ћелије мреже не постану сувише деформисане и да се не преклапају. Стога је неопходно да се веома пажљиво прате промене у величини и облику ћелија и заустави адаптација мреже, ако су премашена дозвољена одступања за ова ограничења.

3.7.2. Генерисање мреже додавањем тачака

Алтернативни приступ који превазилази горе наведене недостатке је додавање тачака у мрежу. Овде се мрежа сукцесивно профињује како грешка апроксимације или нека погодна мера променљивих струјања постане сувише велика [37]. Значајан допринос у овој области дали су Бергер и Џејмсон [38] и Данехофер [39].

Са аспекта адаптације неструктурисане мреже имају велику предност у односу на структурисане. Мрежа састављена од троуглова се лако може кориговати без потребе увођења интерфејса. Другим речима, мрежа остаје у потпуности транспарентна за солвер струјања. Додавање тачака у мрежу може да се изведе било експлицитно уситњавањем троуглова или алтернативно ретриангулацијом мреже, која укључује и додате тачке. Други приступ је посебно погодан за методу триангулације Делонеа [40] и ефикасно је демонстриран од стране Холмса [41]. На Сл. 3.4 показана је адаптивна мрежа са карактеристичним повећањем броја елемената и смањивањем њихове величине у зони где се очекују велике промене величина струјног поља, односно смањивање броја елемената и њихово укрупњавање у зонама где су промене струјног поља мале.



Сл. 3.4 - Пример адаптивне мреже

3.7.3. Тренд у стварању мрежа

Код генерисања мреже од посебног значаја је постизање најтачнијег могућег решење за дати број тачака и процена тачности добијеног решења, а потребан услов су ефикасне и робусне технике меширања. Поред потребе за додатним тачкама у циљу уситњавања мреже, мора се осигурати да облик ћелија мреже као и њихова виткост, односно одступање од једнакоугаоног троугла, остану прихватљиви. То генерално захтева да се у неким областима тачке додају, а у неким бришу. Стога је неопходно дубље разумевање зависности решења од растезања и деформисања мреже. Технике којима се додају или уклањају тачке мреже у одређеним регионима, такође морају бити имплементирани као део пакета адаптивног генерисања мрежа. Гледано са те стране, неструктурисане мреже најбоље испуњавају ове строге захтеве уопштениости и прилагодљивости, иако је много труда уложено у развој структурисаних мрежа, које и даље имају своје место за одређене геометрије и проблеме.

4. ФИЗИЧКО-МАТЕМАТИЧКИ И НУМЕРИЧКИ МОДЕЛ

4.1. Поступак нумеричке симулације

Генерално, поступак моделирања нумеричке симулације састоји се од два дела. У првом делу генеришу се геометрија и нумеричка мрежа. То се може урадити на више начина, а један од њих је да се цео поступак генерисања геометрије и мреже обави у софтверу GAMBIT (предпроцесор за FLUENT). Следећа могућност је да се из неког од програма као што су (UNIGRAPHICS, CATIA, NASTRAN,...) учита геометрија у GAMBIT, а затим у њему генерише нумеричка мрежа, а постоји и могућност да се геометрија и мрежа комплетно генеришу у неком од набројаних програма. У овом раду цео поступак генерисања геометрије и мреже обављен је у софтверу GAMBIT. Други део обухвата припрему потребних података за солвер (софтвер ANSYS FLUENT) којим се решавају осредњене Навије-Стоксове једначине [42]. Овде су дати основни кораци који су заједнички за све врсте струјања, а додатни елементи морају да се дефинишу у случају нестационарних струјања, сагоревања, вишефазних струјања, покретних координатних система, клизних мрежа итд.

Основни кораци су:

1. Учитавање мреже, њена провера, глачање, скалирање итд.
2. Дефинисање типа солвера (сегреговани или спрегнути, експлицитни или имплицитни). Треба водити рачуна да за неке проблеме постоји тачно одређена опција солвера која се мора применити, а да се код других могу применити оба типа солвера. У овом раду је примењен спрегнути, експлицитни солвер.
3. Дефинисање да ли је једначина енергије укључена у систем парцијалних диференцијалних једначина. У овом случају је укључена и преко ње се израчунава температура.
4. Дефинисање модела струјања (невискозно или вискозно, ламинарно или турбулентно) и дефинисање турбулентног модела за турбулентно струјање,

при чему треба водити рачуна о ограничењима ових модела и њиховој области применљивости. У овом раду се решава проблем са турбулентним струјањем вискозног стишљивог флуида.

5. Дефинисање особина флуида и једначине стања. Овде се ради о стишљивом флуиду па је коришћена једначина стања идеалног гаса.
6. Дефинисање референтних услова (притисак, густина, температура), док се утицај гравитационог убрзања не узима у обзир јер се ради о гасовима.
7. Дефинисање граничних услова који обухватају: брзине, протоке, притиске температуре, топлотне флуксе, на чврстим површинама, улазу, излазу и зонама у којима се налази флуид или чврсто тело. Ово је најважнији и најделикатнији корак јер се са нетачним или неодговарајућим граничним условима добијају нетачна решења.
8. Дефинисање реда тачности нумеричке шеме, Курантовог броја (CFL) и фактора релаксације који се користе у решавању једначина струјања и једначина турбулентног модела. Са Курантовим бројем (CFL) у распону од 0,3 до 0,8 добијен је временски корак који је дао стабилан прорачун.
9. Иницијализација струјног поља, односно дефинисање почетних вредности струјних променљивих у свим ћелијама нумеричке мреже.
10. Праћење конвергенције решења, преко грешке, односно остатка на десној страни у свакој од једначина. Узима се да је прорачун завршен када ове грешке падну испод задате вредности у односу на почетну.
11. Постпроцесирање добијених резултата које обухвата цртање расподела појединих величина поља у одговарајућим равнима или дуж одговарајућих линија, цртање вектора брзина, израчунавање сила и момената.

Ширење ударног таласа, услед изласка барутних гасова из цеви минобацача, након испаливања минобацачке мине, је тродимензионални проблем. У изложеној нумеричкој симулацији овај проблем се моделира као 2D, јер коришћени софтвер ни са адаптивном мрежом не може довољно тачно да да положај и јачину ударног

таласа у 3D. Границу нумеричког домена представља кружница полупречника 12 m, односно 100 калибара ($R/d=100$).

Основна мрежа у нумеричком домену састоји се од 48.878 троугаоних елемената, а CPU време (време рада централног процесора) је око 100 сати са процесором Intel Core 2 Quad брзине 2,50 GHz и са 4 GB RAM-а. Треба имати у виду да је дводимензионални ударни талас јачи у поређењу са тродимензионалним, што поређење нумеричких вредности и измереног притиска у изабраним тачкама око минобацача и показује.

У нумеричкој симулацији извршено је одређивање струјног поља са две гасовите компоненте које обухватају ваздух и барутне гасове, односно поред промене поља притиска, густине и Маховог броја, израчунава се и промена концентрације барутних гасова са временом у пољу око минобацача. Два елемента су специфична за разматрану нумеричку симулацију.

Прво, за праћење кретања ударног таласа у коришћеном софтверу, употребљава се посебан експлицитни солвер, који служи за анализу проблема овог типа, односно нестационарних појава са великим градијентима.

Друго, морају се користити такозване адаптивне мреже, које служе да се смањи грешка прорачуна, на тај начин што се сви елементи мреже, у којима вредност градијента прелази унапред задату вредност, деле на више мањих елемената. Овде се динамичка адаптација мреже врши на основу градијента притиска, који има врло велику вредност кроз ударни талас, тако да се сви елементи мреже до којих је дошао ударни талас уситњавају у већи број мањих елемената. Након проласка ударног таласа, зона са уситњеним елементима се аутоматски враћа на првобитни број, чиме се спречава да број елемената мреже буде превелик, а са друге стране грешке прорачуна у зонама глатког струјања, у којима су градијенти мали, су по природи мале, па нема потребе да мрежа буде сувише уситњена.

Код праћења ударног таласа препорука је да се динамичка адаптација мреже врши барем након сваког трећег временског корака, док је извршеним симулацијама то рађено након сваког другог временског корака.

Како се користи експлицитна шема, временски корак ограничен је CFL бројем, који се одређује из услова стабилности прорачуна. Иначе, овај број је количник у коме бројилац представља производ дозвољеног временског корака и највеће брзине ширења поремећаја у струјном пољу, а именилац карактеристичну дужину најмањег елемента нумеричке мреже. За симулацију овако сложених струјних поља вредност CFL броја је увек мања од 1. У извршеним симулацијама стабилан прорачун је добијен за Курантов број између 0.3 и 0.8, а дозвољени временски корак кретао се од $2 \cdot 10^{-8}$ до 10^{-7} s.

4.2. Промене притиска барутних гасова током истицања

У поступку нумеричке симулације излазни пресек, на устима цеви, који одговара мерном месту M2, дефинисан је као улазна граница (pressure inlet), за коју су дате промене вредности: статичког притиска, статичке температуре и масеног удела барутних гасова. При чему полазна вредност масеног удела барутних гасова полази од вредности 1 (односно 100%).

При анализи резултата, треба имати у виду да је мерена само промена статичког притиска са временом, а да су остале величине израчунате посредно или су преузете из расположивих литературних података [43]. Почетна статичка температура барутних гасова у излазном пресеку цеви, израчуната је на основу УБ прорачуна, методом Дроздова [14]. За барутне гасове су узети следећи параметри:

$$k = 1,24$$

$$C_p = 1240 \text{ J/kgK}$$

док је динамичка вискозност за почетну температуру имала вредност

$$\mu_1 = 7,085 \cdot 10^{-5} \text{ Pas,}$$

и одређује се по закону Сатерленда, односно:

$$\mu = \mu_1 \frac{T_1 + 120}{T + 120} \left(\frac{T}{T_1} \right)^{3/2}$$

При чему су μ_1 и T_1 референтне, односно почетне, вредности, динамичке вискозности и температуре барутних гасова ($\mu_1 = 7,085 \cdot 10^{-5} \text{Pas}$ и $T_1=1500 \text{ K}$), а 120 је Сатерлендова константа.

Почетни услови у околини су дефинисани као:

$$P_o = 101325 \text{ Pa}$$

$$T_o = 300 \text{ K}$$

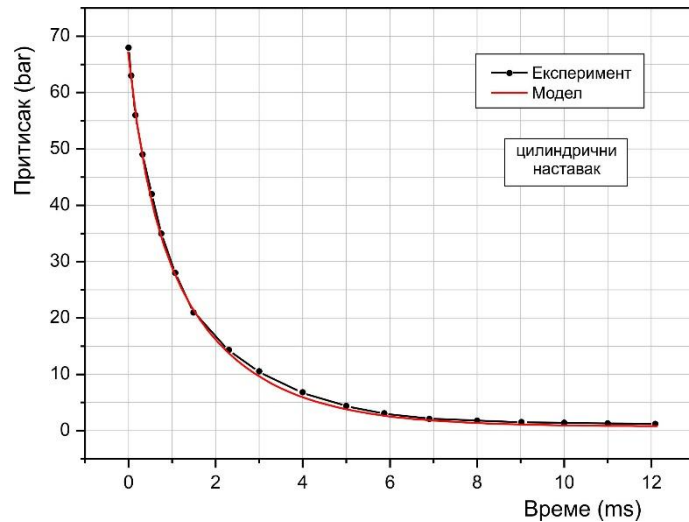
$$M = 28,95 \text{ kg/kmol}$$

Промена притиска барутних гасова, на устима цеви, у току времена $p=p(t)$, дата је за две конфигурације наставака, који се постављају на уста цеви. Прва се односи на наставак цилиндричног облика (Сл. 5.1), а друга на наставак у облику дивергентног млазника (дифузора), чија изводница заклапа угао од 9° са уздужном осом цеви (Сл. 5.3).

За цилиндрични наставак промена притиска барутних гасова на његовом излазном пресеку, добијена је апроксимацијом резултата приказаних на Сл.4.1 и дата је изразом:

$$p = p_p e^{-K_c t} \quad (\text{цилиндрични наставак})$$

при чему је почетни притисак ($p_p = p_{(0)}$) изражен у [bar], а време (t) у [ms], резултати су дати на Дијаграму 4.1. Коефицијент (K_c) износи $0,76 \frac{1}{\text{ms}}$.



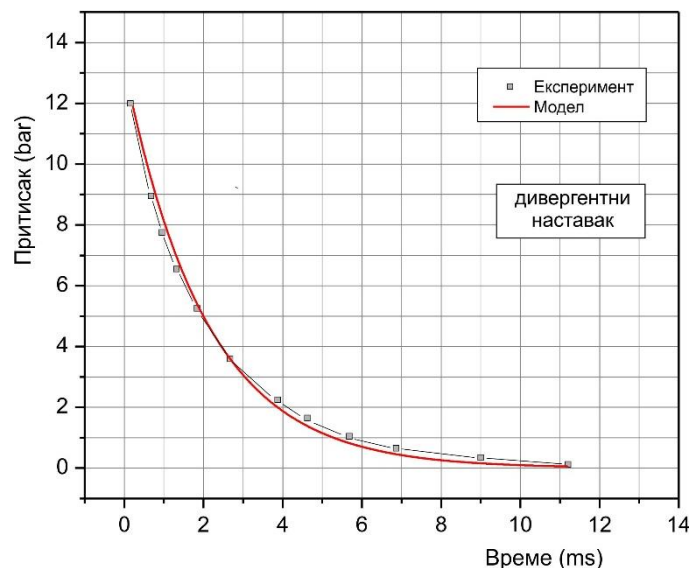
Дијаграм. 4.1 – Промена притиска на устима цеви у излазном пресеку цилиндричног наставка

За наставка са дивергентним млазником, промена притиска барутних гасова на излазном пресеку млазника, дата је изразом:

$$p = p_p e^{-K_m t} \quad (\text{дивергентни млазник})$$

при чему је почетни притисак ($p_p = p_{(0)}$) изражен у [bar], а време у [ms], резултати

су дати на Дијаграму 4.2. Коефицијент (K_m) у овом случају износи $0,5 \frac{1}{\text{ms}}$.



Дијаграм 4.2 – Промена притиска на устима цеви у излазном пресеку дивергентног наставка (млазника)

Вредности почетног притиска (p_p) за цилиндрични наставка (варијанта "А") и дивергентни млазник (варијанта "Д") дате су у табели 7.3 и односе се на мерења извршена на мерним местима М1 и М2, која одговарају улазним и излазним пресецима цилиндричног наставка и дивергентног млазника.

4.3. Једначина промене температуре гаса током истицања

На мерном месту М2, које се односи на излазни пресек наставка који је постављен на уста цеви, дата је промена притиска у зависности од времена, која је потребна као улазни податак за нумеричку симулацију. Међутим, као улазни податак потребна је и временска зависност статичке температуре на мерном месту М2. Овде су изведени изрази за статичку температуру на основу познате зависности притиска од времена. Полази се од једначине енергије за нестационарно струјање [24], која описује промену тоталне температуре флуидног делића при његовом кретању кроз нестационарно струјно поље, а која има облик:

$$\rho \frac{D}{Dt} (c_p T_0) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4.8)$$

Заменејући израз за густину из једначине стања идеалног гаса, добија се

$$\frac{p}{RT} \frac{D}{Dt} (c_p T_0) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4.9)$$

односно уз претпоставку да је, $c_p(T) = const.$

$$\frac{c_p}{R} \frac{1}{T} \frac{DT_0}{Dt} = \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4.10)$$

Ако ставимо

$$\frac{c_p}{R} = \frac{k}{k-1} = m$$

Једначина (4.10) постаје

$$m \frac{1}{T} \frac{DT_0}{Dt} = \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4.11)$$

Како се на устима цеви мерио само притисак, а у једначини (4.11) фигурише тотална температура, користи се зависност између тоталне и статичке температуре дата као

$$T_0 = T \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \quad (4.12)$$

уз претпоставку да је Махов број, у критичном пресеку, на устима цеви, током истицања барутних гасова, приближно једнак 1. Како нам је потребна промена статичке температуре у фиксној тачки, то се материјални извод у горњој једначини замењује са локалним изводом по времену, на следећи начин:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x} \quad m \frac{1}{T} \left(\frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x} \right) \left[T \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \right] = \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial t}$$

Како се ради о промени температуре у фиксној тачки, следи да је, $\frac{\partial}{\partial x} \dots = 0$,

па се даље добија:

$$mr \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4.13)$$

где је

$$r = 1 + \frac{k-1}{2} \quad (4.14)$$

Сада је могуће извршити интеграцију једначине (4.13), па се добија

$$\ln \frac{T}{T_p} = \frac{1}{k} \ln \frac{p}{p_p} \quad (4.15)$$

где је

$$k = mr = \frac{k(k+1)}{2(k-1)} \quad (4.16)$$

док су T_p и p_p почетна температура и притисак. Коначни израз за промену температуре са временом постаје

$$T = T_p \left[\frac{p}{p_p} \right]^{\frac{1}{k}} \quad (4.17)$$

при чему је притисак дат у форми

$$p = p_p e^{-K_c/mt} \quad (4.18)$$

4.4. Почетни и гранични услови

Приликом моделирања овог гасодинамичког процеса, примењене су и коришћене следеће претпоставке:

- целокупна маса барутног пуњења је сагорела до тренутка изласка пројектила из цеви, па се у струји барутних гасова налазе се само гасовите честице без чврсте фазе,
- температура барутних гасова је хомогена у тренутку истицања из цеви,
- занемарен је утицај стуба ваздуха, кога пројектил потискује приликом изласка из цеви (у литератури [11], наведено је да је притисак потиснутог ваздуха, на устима цеви, 25 пута мањи од притиска гасова који истичу из цеви, пример се односи на пушку 5,56x45 mm и метак SS 109),
- барутни гасови започињу истицање из цеви тек по изласку пројектила (када водећи прстен пројектила напусти цев или заптивна-контактна површина код минобацачких пројектила, односно самозаптивни прстен, који је коришћен приликом овог испитивања).

За одређивање физичко-техничких карактеристика гасова, коришћени су подаци дати у [43] и [44].

Почетни услови (за $t_0=0$)

За барутне гасове:

$V(x_i, 0) = 0 \text{ m/s}$ - брзина у тренутку $t_0=0$ има вредност нула у центроидима свих

ћелија нумеричког домена

$\Delta p(x_i, 0) = 0 \text{ Pa}$ - релативни притисак (натпритисак) у тренутку $t_0=0$ има вредност нула у центроидима свих ћелија нумеричког домена

- $T_p = 1500 \text{ K}$ - почетна статичка температура барутних гасова у излазном пресеку цеви
- $k = 1,24$ - однос специфичних топлота барутних гасова C_p/C_v
- $C_p = 1240 \text{ J/kgK}$ - специфична топлота при константном притиску
- $\mu_1 = 7,085 \cdot 10^{-5} \text{ Pas}$ - динамичка вискозност

За ваздух:

- $V(x_i, 0) = 0 \text{ m/s}$ - брзина ваздуха у непо ремећеној средини
- $p = 101325 \text{ Pa}$ - притисак ваздуха у непо ремећеној средини
- $T = 300 \text{ K}$ - температура околног ваздуха
- $M = 28,95 \text{ kg/kmol}$ - моларна маса вазуа
- $\rho = 1,1768 \text{ kg/m}^3$ - густина околног ваздуха у центроидима свих ћелија нумеричког домена

Гранични услови

- На зидовима цеви брзина гаса је једнака нули, јер се ради о вискозном флуиду,
- Спољна граница нумеричког домена је дефинисана радијусом $R=12 \text{ m}$ (100 калибара), при чему је задовољен услов да за прорачунско време ударни талас не дође до границе домена,
- На спољној граници домена све величине флуида остају једнаке вредностима околног непо ремећеног ваздуха,
- Махов број је у критичном пресеку, на устима цеви, једнак јединици ($M=1$).

5. РАЗМАТРАЊЕ КОНСТРУКЦИОНИХ РЕШЕЊА ЗА УМАЊЕЊЕ БЛАСТ ЕФЕКТА

Појаве које се јављају у процесу опаљења, а изазване су наглим истицањем барутних гасова из цеви оруђа могу имати неповољан утицај на систем оружје-пројектил и саму посаду. Из тог разлога се јавља потреба да се добро изуче и да се нађе начин умањења њиховог негативног деловања. За разлику од других механичких утицаја, они су настали деловањем барутних гасова. Ови ефекти се испољавају на устима цеви, познати су као “бласт ефекти” и манифестују се импулсним ударним и звучним ефектима. Иако се генерално појам “бласт ефекта” може односити и на експлозије, односно рушеће дејство експлозивних пуњења, у овом раду се под овим појмом подразумевају појаве које су карактеристичне за процес опаљења, а проузроковане су наглим истицањем барутних гасова и јављају се на устима цеви и у непосредној зони око оруђа.

Звучни ефекти нису толико утицајни са становишта дејства на систем оружје-пројектил, али могу да делују штетно на слух људи, нарочито код оруђа великог калибра. Звучни ефекат је нарочито непожељан код оружја која се употребљавају за борбу на блиском растојању (дејства у урбаним срединама, диверзантска дејства и сл.) јер демаскирају стрелца и откривају његов положај.

Да би се пригушио звук, односно пуцањ, на уста цеви се постављају посебно конструисани уређаји - пригушивачи, који у великој мери умањују звучни ефекат, пригушујући јачину звука.

Што се тиче ударног дејства, оно се манифестује кроз појаву ударних таласа и за последицу има повећање притиска у зони појаве.

У простору око оруђа се због несагорелих чврстих честица и гасовитих продуката барутног пуњења и њиховог накнадног сагоревања, јавља појава примарног пламена, који такође представља неповољну појаву, због демаскирајућег ефекта и могућег неповољног утицаја на посаду.

Поред наведених нежељених ефеката, током опаљења, се јавља и појава натпритиска, коју такође узрокују барутни гасови, а чије се дејство уочава у непосредној близини оруђа

У циљу умањења или елиминисања наведених појава, код минобацача, разматрана су различита техничка и конструкциона решења уређаја, који се постављају на уста цеви. Ови уређаји су познати као "бласт дифузори" или "бласт пригушивачи".

5.1. Конструкциона решења за умањење бласт ефекта

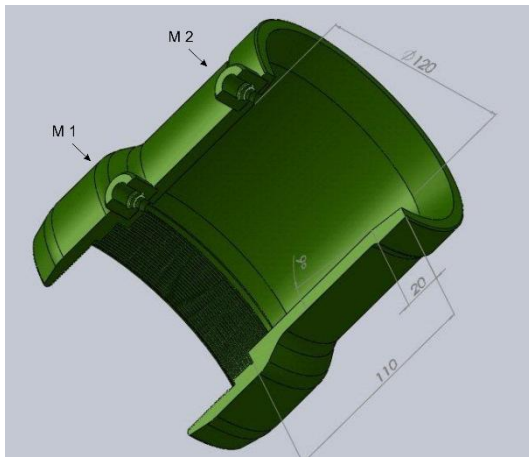
У овом раду су разматрана конструкциона решења која са својим карактеристикама могу да допринесу елиминацији непожељних утицаја описаних појава. Иако предложена решења могу у себи да садрже и друге елементе и уређаје којима се повећава прецизност пројектила или се обезбеђује већа безбедност при гађању из минобацача, задржаћемо се на основној идеји да се применом ових уређаја умањују штетне последице "бласт ефекта".

Одабране су следећа конструкциона решења, која се постављају на уста цеви минобацача у циљу смањења "бласт ефекта":

- цилиндрични наставак,
- цилиндрично-дивергентни млазник
- дивергентни млазник.

Цилиндрични наставак

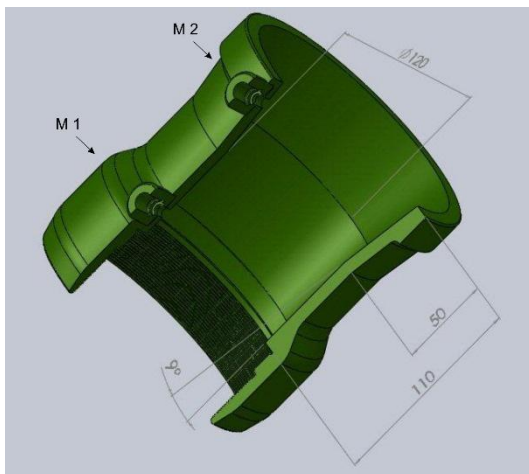
Конструкционо решење цилиндричног наставка је приказано на Сл. 5.1., са прикључцима за мерење притиска барутних гасова који истичу из цеви (M1 и M2). Мерно место M1 се налази на почетном пресеку наставка, а мерно место M2, на излазном пресеку. Очекивања су да ће ово решење довести до мањег повећања почетне брзине пројектила и да ће у мањој мери утицати на смањење нивоа притиска на устима цеви, односно натпритиска око оруђа.



Сл. 5.1 – Цилиндрични наставак цеви са мерним местима М1 и М2 за мерење притиска (модел и опитни уређај)

Цилиндрично-дивергентни млазник

Код овог решења се на почетном пресеку цилиндричног дела налази мерно место М1, а на излазном пресеку дивергентног дела се налази мерно место М2 (Сл. 5.2). Предвиђа се да ово решење може да обезбеди нижи ниво притиска на устима цеви и смањење нивоа натпритиска око оруђа.

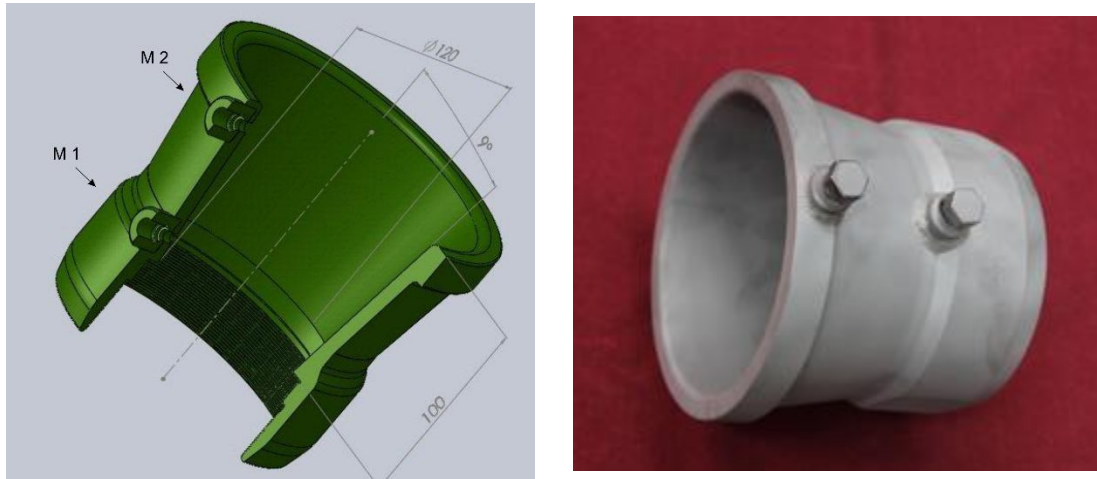


Сл. 5.2 – Цилиндрично-дивергентни наставак цеви са мерним местима М1 и М2 за мерење притиска (модел и опитни уређај)

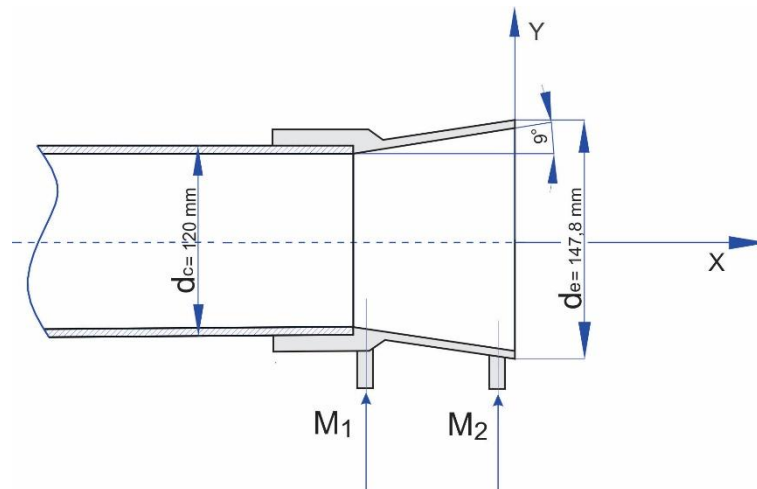
Дивергентни млазник

Претпоставка је да ће ово решење обезбедити значајније смањење притиска барутних гасова у излазном пресеку дивергентног дела млазника, чиме ће се

остварити смањење нивоа натпритиска барутних гасова око оруђа. Мерно место M1 се налази на почетном пресеку дивергентног млазница, а мерно место M2 на излазном пресеку (Сл. 5.3 и 5.3а).



Сл. 5.3 – Дивергентни наставка цеви са мерним местима M1 и M2 за мерење притиска (модел и опитни уређај)



Сл. 5.3 – Скица положаја мерних места M1 и M2 за мерење притиска (на примеру дивергентног наставка)

Описана решења су израђена и коришћена за реализацију експеримената током испитивања гађањем из прототипа минобацача 120 mm M95, у циљу утврђивања њиховог утицаја на наведене "бласт" ефекте.

5.2. Осврт на светска решења

- "Бласт дифузор"

Значајан успех у развоју самоходних минобацачких система 120 mm, који су интегрисани на платформи возила, остварила је сингапурска компанија, "Singapore Technologies Kinetics - STK". Ова компанија је пројектовала и развила један од најновијих минобацача, 120 mm "Super Rapid Advanced Mortar System - SRAMS", на који је интегрисан "бласт дифузор", [45] и [46]. Основне техничке карактеристике овог система су дате у Табели 5.1.

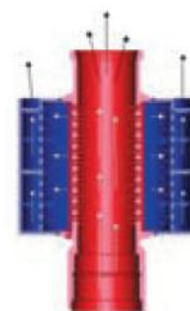
Табела 5.1- Техничке карактеристике МБ 120 mm SRAMS

Техничке карактеристике самоходног минобацача 120 mm SRAMS	
Калибар основног наоружања (mm)	120, глатка цев
Дужина цеви [m]	1,8
ПТ уређај	Хидраулични
Специјални уређаји	<ul style="list-style-type: none">- полуаутоматски пуњач- дифузор,- систем за хлађење цеви,- вентил на задњаку
Маса минобацача [kg]	мања од 1200
Сила удара коју прима платформа при највећем пуњењу разорне мине [kN]	мања од 200
Елевација [°]	од 40 до 80
Правац [°]	удесно и улево по 28
Домет, највећи (km)	8,2 са разорном мином, 9, са мином повећаног домета, 13, са ракетизираном мином
Брзина гађања, највећа устаљена	до 10 мина/мин
Време готовости [s]	60
Борбени комплет (ком)	58 мина
Број послужилаца	3 (командир, пунилац, возач)

Овај модел је намењен за уградњу на точкашке и гусеничне платформе велике покретљивости. Поседује глатку цев, дужине 1,8 m и противвртзајући уређај са којим је по први пут, код минобацача, сила реакције на подлогу, при гађању са највећим барутним пуњењем, сведена на вредност мању од 200 kN (Сл. 5.4).

На крају цеви, овог минобацача, уграђен је "бласт дифузор", Сл.5.4-ц, који представља оригинално, патентирано, решење. Дифузор је уграђен са циљем да се

постигне прихватљив ниво оптерећења за послужиоце оруђа, односно да се вредност натпритиска барутних гасова (*blast overpressure - BOP*) сведе на дозвољен ниво. Уградњом овог дифузора обезбеђује се значајније смањење нивоа натпритиска, а тиме се постиже да посада може извршити гађање са већим бројем пројектила, са ватреног положаја, без бојазни да ће доћи до повређивања.



а) 120mm SRAMS на возилу "SPIDER"

б) минобацач 120 mm "SRAMS"

ц) "бласт дифузор"

Сл. 5.4 - Минобацач 120 mm "Super Rapid Advanced Mortar System - SRAMS"

Дифузор је дизајниран као симетричан уређај са централним носачем и са по две бочне коморе, постављене на обе стране. У тренутку изласка пројектила, барутни гасови под великим притиском истичу кроз радијално постављене отворе у дифузор, најпре у унутрашње бочне коморе а након тога кроз други ред радијалних отвора у спољне коморе, при чему врше експанзију на нижи ниво притиска и истичу у околну атмосферу, у смеру гађања.

На овај начин се остварују прихватљиви услови за рад посаде, на платформи возила, где је реализована концепција "отворене уградње" минобацача. Са овим смањењем натпритиска и уз коришћење заштите (антифона) за уши посада може изгађати до сто пројектила у току дана. Ово се односи на најнеповољније услове гађања са највећим барутним пуњењима и при брзој паљби.

Недостаци овога решење са "бласт дифузором", огледају се у томе што се значајно повећава реактивна сила на подлогу, што је на минобацачу 120 mm SRAMS, решено уградњом врло ефикасног противвртзајућег система. Поред тога, већа дужина цеви,

са уграђеним дифузором, доводи до отежаног пуњење минобацача, што је у овом случају решено полуаутоматским пуњачем пројектила.

По расположивим подацима реализација овог минобацача је започела, пре 2000. године, а развој је завршен крајем 2006. године. Током његове реализације примењено је више техничких решења која су довела до унапређења тактичко-техничких карактеристика овог минобацачког система.

Да би се убрзао поступак пуњења, који је успорен због силаска мине на дно цеви, јер се мина спушта кроз цев, неколико секунди, истискујући ваздух који пролази између мине и зида цеви, реализовано је решење са вентилом, који обезбеђује да се мина брже спушта кроз цев, јер ваздух из простора испод ње истиче кроз вентил, а кад мина удари у дно цеви вентил се аутоматски затвара.

Да би се, током брзе паљбе, избегла појава да се цев минобацача претерано загреје, тако да буде толико врела да изазове самопаљење барутног пуњења и пре иницијације капислом, уграђен је посебан систем за хлађење цеви изнутра компримованим ваздухом и воденом паром, који се убризгавају кроз вентиле на задњаку. Хлађење цеви је синхронизовано са циклусом гађања.

Приликом интеграције минобацача "SRAMS" на возило HMMWV, формуле погона 4x4, дошло је до делимичне модификације шасије, која се састојала у уградњи једне широке хидрауличне стопе испод задњег краја, која се приликом гађања спушта и упире у тло, а задњи точкови возила се подижу са тла, што при гађању растеређује систем ослањања на возилу и платформу чини стабилнијом.

- Пригушни уређај (Blast Attenuation Device - BAD)

Овај уређај је интегрисан на вученом минобацачу 81 mm M252, повећаног домета, калибра 81 mm [43], настао је модернизацијом старије верзије британског минобацача 81 mm L16A2, при чему му је домет повећан са 4.500 m на 5.650 m. Ово повећање домета износи 25% и остварено је новим и јачим барутним пуњењем, што је за последицу имало повећање надпритиска у зони око минобацача. Остале техничке карактеристике средства су приказане у Табели 5.2. Овде је у циљу смањења натпритиска примењен пригушни уређај (Blast Attenuation Device - BAD),

иако се ради о минобацачу калибра 81 mm. На овај начин је умањен утицај “бласт ефекта”, односно смањен је натпритисак у зони где је посада.

Пуњење се врши ручно са стране уста цеви. Посаду чини пет чланова. Укупна маса минобацача је 41,3 kg, а дужина цеви је 1,27 m. Налази се у наоружању: САД, УК и Канаде.

Табела 5.2 - Техничке карактеристике МБ 81mm M25

Техничке карактеристике вученог минобацача 81mm M252	
Калибар цеви (mm)	81, глатка цев
Дужина цеви (m)	1,27
Специјални уређаји	- пригушни уређај BAD (Blast Attenuation Device)
Маса минобацача (kg)	мања од 41,3
Елевација (°)	од 45 до 85
Домет, највећи (km)	5,65 са разорном мином,
Брзина гађања, највећа устаљена	8 - 16 мина/min (непрекидно) 20 -30 мина/min (брза паљба)
Број чланова посаде	5
Начин превозења	вучено средство



Преглед самоходних минобацачких система

Потреба за ефикасним и мобилним средствима ватрене подршке, условила је развој већег броја самоходних минобацачких система, куполног или отвореног начина уградње. Они су интегрисани углавном на лако оклопљеним или неоклопљеним точкашким и гусеничним платформама и приказани су на сликама (Сл. 5.5 – 5.11).



Сл. 5.5 – Патриа "AMOS" са двоцевном минобацачком куполом калибра 120 мм



Сл. 5.6 (а, б) – Самоходни минобацачки систем 120 мм на точкашкој платформи Пандур II, 8x8 интегрисан минобацач "Soltam Cardom"



Сл. 5.7 - Самоходни минобацач 120 тт 2R2М на точкашкој платформи бхб



Сл. 5.8 - "Тигар" - Самоходни минобацачки систем 120 тт интегрисан на точкашкој шасији погона 4x4, са стопама за ослањање



Сл. 5.9 - "Patria NEMO" са једноцевном куполом у коју је интегрисан минобацач калибра 120 тт



Сл. 5.10 - "SPEAR MK2" потпуно аутономан минобацачки систем калибра 120 мм интегрисан на точкашкој лако-оклопљеној шасији погона 4x4 (HMMWV, JEEPS) са ефикасним хидроеластичним системом који обезбеђује висок ниво редуције силе на подлогу, укупне масе без аутоматског пуњача је 200 кг, производи Elbit Systems



Сл. 5.11 - BAE Systems – General Dynamics, Advanced Mortar System II (AMS II) купола минобацача калибра 120 мм

6. ГАСОДИНАМИЧКИ ПРОРАЧУНИ

6.1. Прорачун аналитичком методом "Орлова"

За прорачун натпритиска, барутних гасова, око оруђа (минобацач 120 mm M95), коришћена је аналитичка метода Орлова [10]. Ова метода је базирана на претпоставци да импулсно истицање барутних гасова доводи до сабијања околног ваздуха, што изазива краткотрајно повећање натпритиска, око оруђа. На основу брзине истицања и разлике у интензитету притиска, који влада иза ударног таласа и притиска у околној, непоремећеној средини, израчунава се вредност натпритиска, на карактеристичним местима око оруђа. Полазне једначине и извођење обрасца за израчунавање вредности натпритиска барутних гасова (Δp) дати су у поглављу 2, кроз једначине од (2.1) до (2.7).

У прорачуну су коришћене вредности, које представљају конструкционе и техничке карактеристике оруђа и пројектила. Као полазни подаци коришћене су вредности добијене унутрашњебалистичким прорачуном Серебрјакова [48], који се користи за минобацачке системе са глатком цеви.

а) Прорачун натпритиска (цев са цилиндричним уређајем)

Прорачун натпритиска, за случај гађања из минобацача 120 mm M95, на коме се налазила цев са **цилиндричним наставком**, извршен је коришћењем раније дате једначине (3.4).

$$\Delta p = \frac{2}{k+1} (Q^2 - 1) p_u \frac{W_{kn}}{\pi R^2 \left(\frac{2}{3}R + h\right)} \cdot \frac{1 + \cos^2 \frac{\varphi}{2}}{2}$$

Полазни прорачунски подаци за случај гађања са ЛТФ мином 120 mm M62П6 и торментачним барутним пуњењем (О+7) су:

$v_0 = 375 \text{ m/s}$ - брзина пројектила на устима цеви

$k = 1,24$ - однос специфичних топлота (c_p/c_v)

$Q = \frac{\beta v_0}{a}$	- однос брзине истицања са брзином звука
$\beta = \frac{1300}{v_0}$	- коефицијента накнадног дејства барутних гасова
$a = 341 \text{ m/s}$	- брзина звука у ваздуху
$R \text{ [m]}$	- растојање тачке, за коју се израчунава вредност натпритиска (Δp) од уста цеви
$W_{kn} = 0,0215 \text{ m}^3$	- запремина канала цеви
$p_m = 1137 \cdot 10^5 \text{ Pa}$	- највећи (максимални) притисак б/г у комори оруђа
$p_u = 208 \cdot 10^5 \text{ Pa}$	- притисак б/г на устима цеви (у тренутку изласка пројектила)
$h = 1,344 \text{ m}$	- висина ватрене линије
$\varphi \text{ [}^\circ\text{]}$	- угао који заклапа линија која пролази кроз уста цеви и тачка за коју се одређује вредност (Δp) у хоризонталној равни

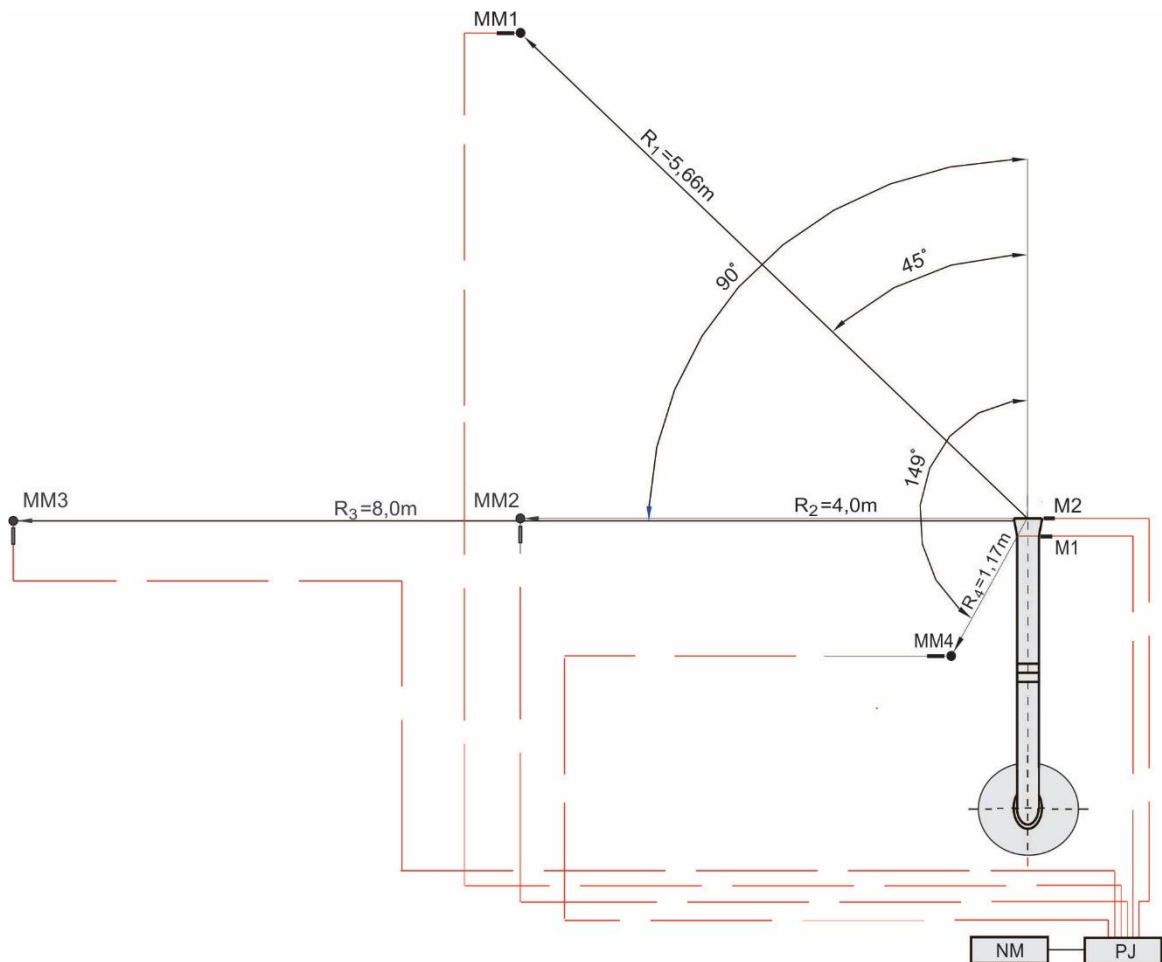
Полазни прорачунски подаци за случај гађања са мином 120 mm XM95 и барутним пуњењем (О+10), сем доле наведених, су већ дати и идентични су са горе наведеним подацима за ЛТФ мину 120 mm М62П6 и торментачно барутно пуњење (О+7):

$v_0 = 399 \text{ m/s}$	- брзина пројектила на устима цеви
$p_m = 1401 \cdot 10^5 \text{ Pa}$	- највећи (максимални) притисак б/г у комори оруђа
$p_u = 256 \cdot 10^5 \text{ Pa}$	- притисак б/г на устима цеви (у тренутку излазак пројектила)

Тачке прорачуна, одговарају мерним местима од ММ1 до ММ4, која су дефинисана и дата на Сл. 6.1. Припадајућа растојања (R_i) и угловни положаји (φ_i), мерних места, односно тачака у којима се прорачунава натприсак. Тачке прорачуна ММ1, ММ2 и ММ3 се налазе на висини ватрене линије, односно уста цеви, ММ4 се налази на висини $h=0,8 \text{ m}$. Тачке прорачуна су одређене растојањем $R_i \text{ [m]}$ и углом који заузимају у односу на осу цеви $\varphi_i \text{ [}^\circ\text{]}$, према следећем:

- MM1 - ($R_1 = 5,66 \text{ m}$, $\varphi_1 = 45^\circ$)
- MM2 - ($R_2 = 4,00 \text{ m}$, $\varphi_2 = 90^\circ$)
- MM3 - ($R_3 = 8,00 \text{ m}$, $\varphi_3 = 90^\circ$)
- MM4 - ($R_4 = 1,17 \text{ m}$, $\varphi_4 = 149^\circ$)

Поред распореда мерних места , шематски је приказана и мерна инсталација са преносном јединицом (PJ) и носачем меморије (NM).



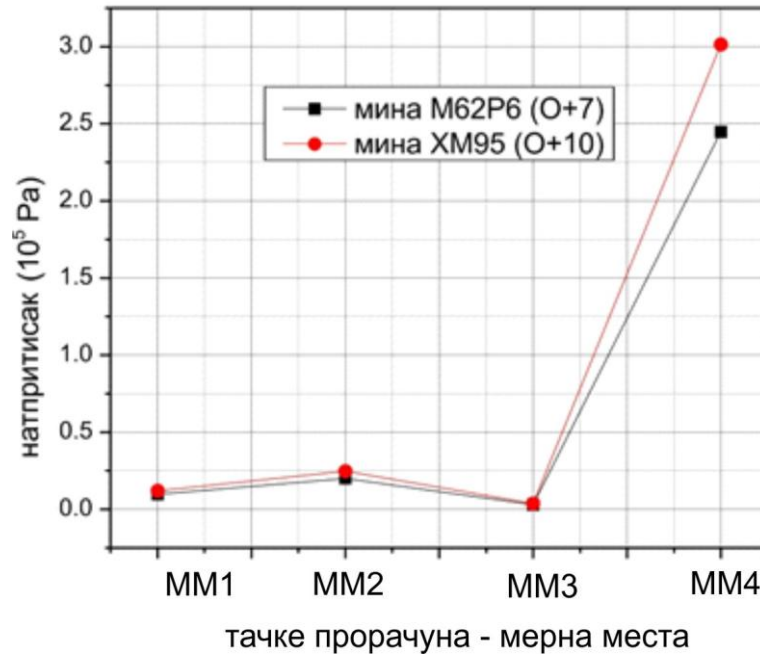
Сл.6.1 – Распоред тачака за које је урађен прорачун натпритиска око оруђа (одговарају мерним местима MM 1, 2, 3 и 4) за случај гађања из МБ 120 mm M95

Табела 6.1 – Резултати прорачуна натпритиска барутних гасова, при гађању из МБ 120 mm М95 (цев са цилиндричним наставком) са минама 120 mm М62П6 ЛТФ и ХМ95, аналитичка метода - Орлова

Минобацач	120 mm М95	
	120 mm М62П6 ЛТФ	120 mm ХМ95
барутно пуњење	(О+7)	(О+10)
ММ1	$\Delta p = 0,097 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,119 \text{ bar}$
ММ2	$\Delta p = 0,200 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,246 \text{ bar}$
ММ3	$\Delta p = 0,030 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,037 \text{ bar}$
ММ4	$\Delta p = 2,448 \text{ bar}$	$\Delta p = 3,013 \text{ bar}$

Преглед максималних вредности натпритиска (Δp), израчунатих класичном методом Орлова, приликом гађања са мино,бацачким минама 120 mm М62П6 ЛТФ и 120 mm ХМ95 из минобацача 120 mm М95, за тачке прорачуна 1, 2, 3 и 4, дат је у табели 6.1 и приказан је на дијаграму 6.1.

Добијени резултати показују реалне вредности максималног натпритиска за тачке прорачуна које се налазе на даљинама 4,0 m, 5,66 m и 8,0 m (места 1, 2 и 3), док је за место 4, које се налази на растојању 1,17 m, добијена нереално велика вредност максималног натпритиска. Прорачун је вршен на основу једначине (3.4), код које највећи утицај на израчунате вредности натпритиска има растојање тачке за коју се врши прорачун од уста цеви и обрнуто је пропорционално трећем степену растојања R. Такође ова једначина је коришћена углавном за прорачун натпритиска код артиљеријских оруђа на већим растојањима од уста цеви, слично као за тачке прорачуна 1, 2 и 3, док за мала растојања карактеристична за положај нишанције код минобацача, непосредно уз цев, није примењива.



Дијаграм 6.1 – Резултати прорачуна натпритиска барутних гасова, за карактеристична места: 1, 2, 3 и 4, за случај опаљења из МБ 120 тт М95 (цев са цилиндричним наставком) са минама 120 тт М62П6 и XM95, аналитичка метода - Орлова.

б) Прорачун натпритиска (цев са дивергентним млазником)

Прорачун за случај гађања из цеви са **дивергентним млазником** је обављен на основу једначине (6.1).

$$\Delta p = \frac{2}{k+1} (Q^2 - 1) p_u \frac{W_{kn}}{\pi R^2 \left(\frac{2}{3}R+h\right)} \cdot \frac{1+\cos^2\frac{\varphi}{2}}{2} \cdot K_m \quad (6.1)$$

Једначина (6.1) је проистекла из једначине (2.4) увођењем корекционог коефицијента K_m , на крају израза, чиме се узима у обзир умањење притиска на устима цеви, због експанзије барутних гасова у дивергентном млазнику и због додатног усмеравања гасне струје, током истицања, у смеру изласка пројектила.

$$K_m = \frac{D_c^2}{D_e^2} (1,05 + \cos \varphi)$$

D_e (m) - пречник излазног пресека млазника

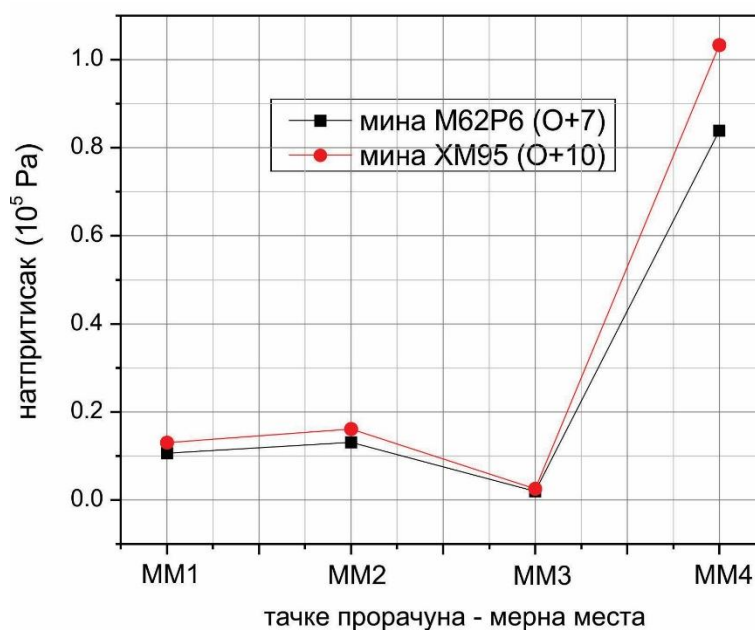
D_c (m) - пречник цеви (калибар)

φ (°) - угао који заклапа тачка за коју се израчунава вредност (Δp) са осом цеви

Израчунате су вредности натпритиска (Δp), за места: 1, 2, 3 и 4, за која важе исте вредности растојања (R_i) и угловног положаја (φ_i), као и код цилиндричног наставка и приказане су у табели 6.2 и дијаграму 6.2.

Табела 6.2 – Резултати прорачуна натпритиска барутних гасова, при гађању из МБ 120 mm М95 (цев са дивергентним млазником) са минама 120 mm М62П6 ЛТФ и ХМ95, аналитичка метода – Орлова

Минобацач	120 mm М95	
	120 mm М62П6 ЛТФ	120 mm ХМ95
барутно пуњење	(О+7)	(О+10)
ММ1	$\Delta p = 0,106 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,130 \text{ bar}$
ММ2	$\Delta p = 0,131 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,161 \text{ bar}$
ММ3	$\Delta p = 0,020 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,025 \text{ bar}$
ММ4	$\Delta p = 0,839 \text{ bar}$	$\Delta p = 1,033 \text{ bar}$



Дијаграм 6.2 – Резултати прорачуна натпритиска барутних гасова, за карактеристична места: 1, 2, 3 и 4, за случај опаљења из МБ 120 mm М95 (цев са дивергентним млазником) са минама 120 mm М62П6 ЛТФ и ХМ95, аналитичка метода - Орлова.

У овом случају су такође добијене задовољавајуће вредности максималног натпритиска за тачке: 1, 2 и 3, док је за тачку 4 добијена нереално велика вредност, па се може применити исто објашњење као код цилиндричног наставка. У оба случаја (цилиндрични наставка и млазник) су добијене веће вредности натпритиска са мином XM95, што је очекивано јер са барутним пуњењем (O+10) остварује већи притисак барутних гасова у цеви, односно на устима цеви.

6.2. Гасодинамички прорачун са физичко-математичким моделом

Нумеричка симулација је у основи обављена из два дела. У првом делу генерисана је геометрија и нумеричка мрежа, а у другом делу је извршена припрема потребних података за солвер, коришћеног софтвера, ANSYS FLUENT, којим се решавају осредњене Навије-Стоксове једначине.

Сви неопходни кораци, потребни за реализацију нумеричког прорачуна, дати су у поглављу 4.1, где је описан поступак нумеричке симулације.

У претходно изложеном класичном прорачуну, се на бази одговарајућих аналитичких израза израчунава највећа вредност, коју достиже натпритисак, у појединим карактеристичним тачкама, око оруђа.

Нумеричка симулација даје предуслове, који обезбеђују, да се прорачуном могу добити карактеристичне вредности, гасне струје, која се ослобађа у поступку опаљења. Стање гасне фазе продуката сагоревања и околног ваздуха се може пратити у простору и времену. На овај начин се нумеричком методом прорачуна могу израчунати следећи параметри гасне струје: брзина, густина, притисак и расподела масеног удела продуката сагоревања у околном ваздуху.

Поред наведених параметара, који могу да се прате по времену у дефинисаном простору око оруђа, јасно се уочава и фронт ударног таласа, који се креће кроз простор, изазивајући промену стања у околној непо ремећеној средини. Поремећај се манифестује као нагла промена карактеристичних параметара околне средине: притиска, температуре и густине гаса.

6.2.1. Двостандимензионална (2D) нумеричка симулација

Промена поменутих физичких величина, које карактеришу гасну струју, у току опаљења оруђа, је нестационарна и тродимензионална просторна појава. Пошто се ради о оносиметричној појави, прво је урађена 2D нумеричка симулација, а добијени резултати су приказани, у Прилозима од 1.1 до 1.8.

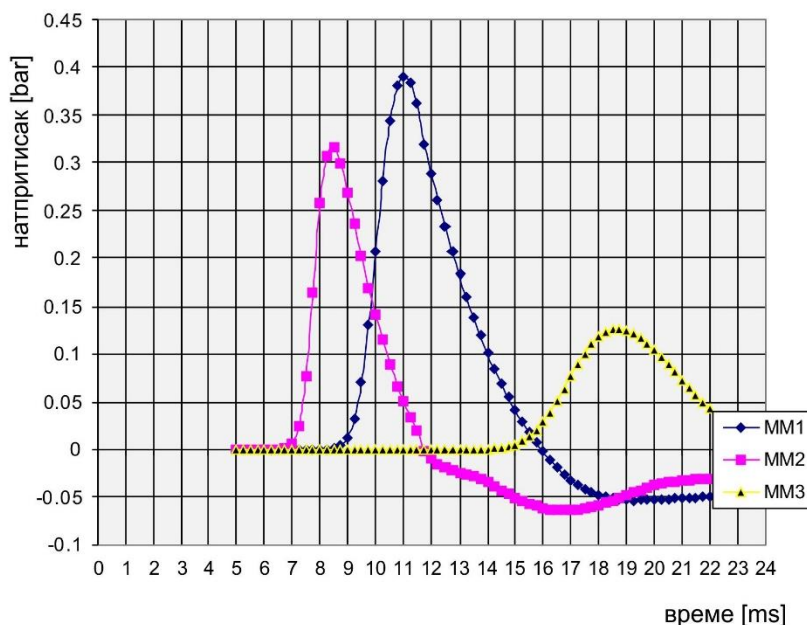
Упоредни резултати гасодинамичког прорачуна, који су добијени на бази 2D нумеричке симулације, приказани су у табели 6.3 и односе се на минобацач 120 mm M95 и мину 120 mm M62П6 ЛТФ, при условима гађања са торментачним барутним пуњењем (О+7). Резултати овог прорачуна су дати у Табели 6.3, за карактеристичне тачке прорачуна (ММ 1, 2, 3 и 4), за случајеве гађања из минобацача са цилиндричним и дивергентним наставком постављеним на уста цеви.

Табела 6.3 – Резултати гасодинамичког прорачуна натпритиска (2D), за МБ 120 mm M95 (цилиндар и млазник) и мину 120mm M62П6 ЛТФ (О+7)

Минобацач	120 mm M95	
мина – б/п	120 mm M62П6 – (О+7)	
уређај на цеви	Цилиндар	Млазник
ММ1	$\Delta p = 0,390 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,206 \text{ bar}$
ММ2	$\Delta p = 0,317 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,162 \text{ bar}$
ММ3	$\Delta p = 0,127 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,066 \text{ bar}$
ММ4	$\Delta p = 0,489 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,129 \text{ bar}$

а) Гасодинамички прорачун (2D), цев са цилиндричним наставком

Гасодинамичким прорачуном су израчунате вредности натпритиска, које су приказане у функцији времена ($p(t)$ - крива притиска), за карактеристичне тачке прорачуна: 1, 2 и 3, у случају гађања из минобацача 120 mm M95 (цев са цилиндричним наставком), са мином 120 mm M62П6 ЛТФ и дате су на дијаграму 6.3.



Дијаграм 6.3 – Гасодинамички прорачун (2D), резултати натпритиска барутних гасова, дати у функцији времена и израчунати за карактеристична места: 1, 2 и 3, за случај опаљења из МБ 120 mm М95 (цев са цилиндричним наставком) са мином 120 mm М62П6 ЛТФ

На приказаним дијаграмима се уочава почетни скок притиска, који је карактеристичан за тренутак наилаaska ударног таласа (УТ), овај део $p(t)$ криве притиска је скоро вертикална линија, са великим градијентом пораста. Након почетне фазе натпритиска јавља се друга фаза, коју карактериште зона потпритиска, која је значајно мањег интензитета и која се асимптотски приближава вредностима притиска околног ваздуха, изједначавајући се са њима. Овај облик добијених дијаграма промене притиска, карактеристичан је за појаве наглог истицања барутних гасова из цеви артиљеријских оруђа, односно у случају овог прорачуна минобацача 120 mm. Фронт ударног таласе најпре наилази на тачку 2, која је удаљена 4 m улево, у односу на уста цеви, са брзином наилаaska од 470 m/s. Након тога УТ наилази на тачку 1, која се налази на растојању од 5,66 m, а у односу на уста цеви је постављена под углом од 45° улево, са брзином наилаaska од 515 m/s. Након тога УТ наилази на тачку 3, која се налази на 8 m улево, у односу на уста цеви, крећући се брзином од 430 m/s. На приказаним дијаграмима је евидентно да максимални притисак у зони наилаaska УТ опада са растојањем од извора

поремећаја (уста цеви) и да се брзина наиласка УТ такође смањује са растојањем од уста цеви.

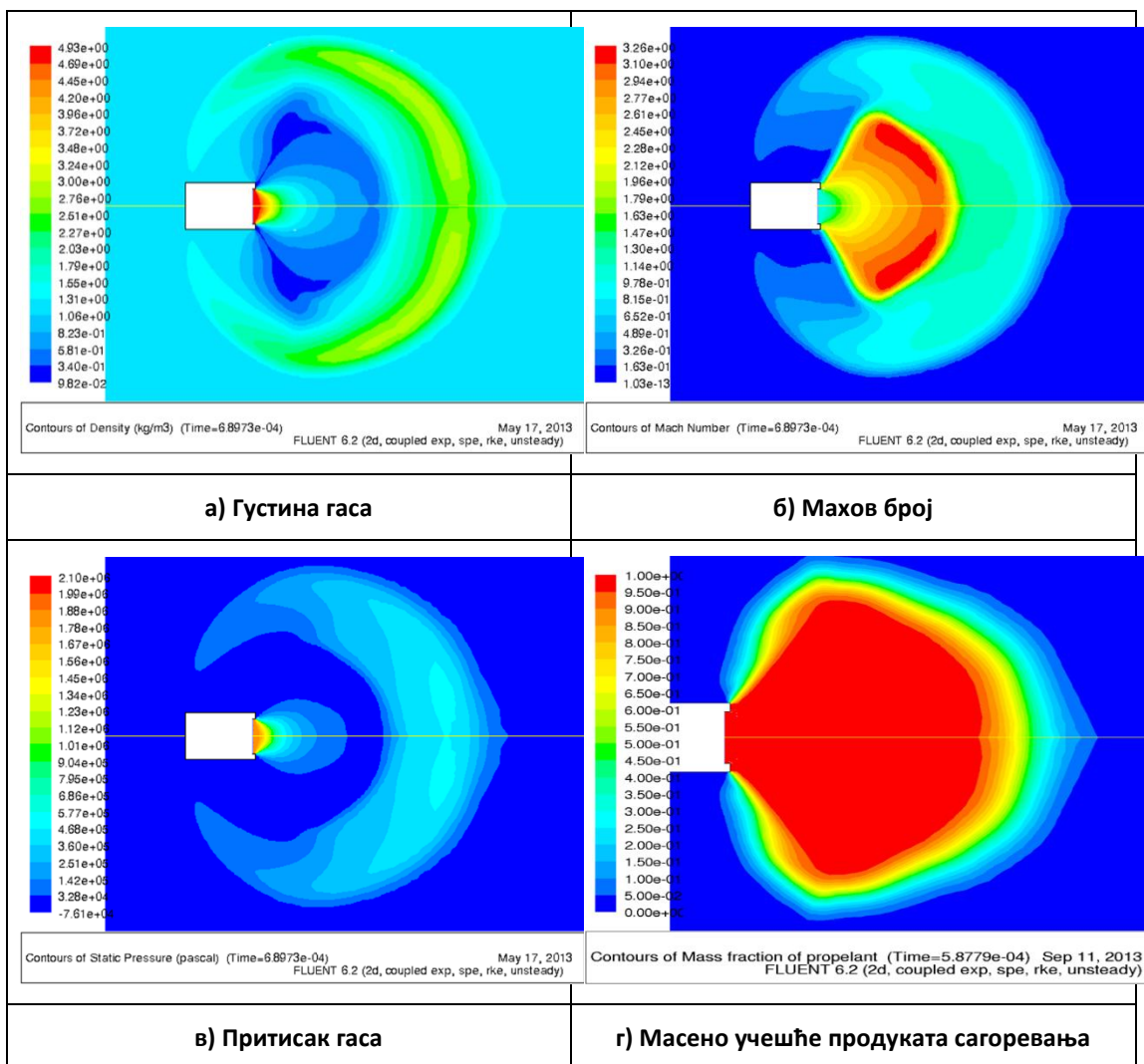
Такође се уочава да је брзина УТ већа у правцу простирања под углом од 45° него у бочном правцу, под углом од 90° , ова појава утиче на његову деформацију, односно облик УТ.

На дијаграмима који су дати у Прилогу 1.3, уочава се појава преласка из фазе натпритиска у потпритисак, што је такође приказано и на дијаграму 6.3, а односи се на карактеристичне тачке 1 и 2. Дијаграми приказани у Прилозима 1.1 - 1.4, такође указују на чињеницу да се УТ простире различитим брзинама, у зависности од правца кретања. Највећа брзина УТ се остварује у правцу кретања гасне струје која се поклапа са осом цеви минобацача и одговара смеру изласка пројектила из цеви (угао $\varphi = 0^\circ$). Брзина УТ достиже највећу вредност од 3,48 М у тренутку $t=1,128 \text{ ms}$ (Прилог 1.2). Повећањем угла φ , којим се означава угао правца простирања УТ у односу на осу цеви (Сл. 6.1), брзина УТ опада, тако да важи неједначина: $(v_{\text{УТ}}(0^\circ) > v_{\text{УТ}}(45^\circ) > v_{\text{УТ}}(90^\circ))$.

На основу ових чињеница и увидом у дијаграме из Прилога 1.1 – 1.4, може се закључити да струја млаза истичућих барутних гасова има облик конуса, што је већ наведено у поглављу 2.3.2.

Карактеристичне величине гасне струје, за случај опаљења из МБ 120 mm М95 (цев са цилиндричним наставком), са мином 120 mm М62П6 ЛТФ, одговарају тренутку времена око 0,7 ms, после изласка мине из цеви и приказане су на дијаграму 6.4 (а, б, в и г).

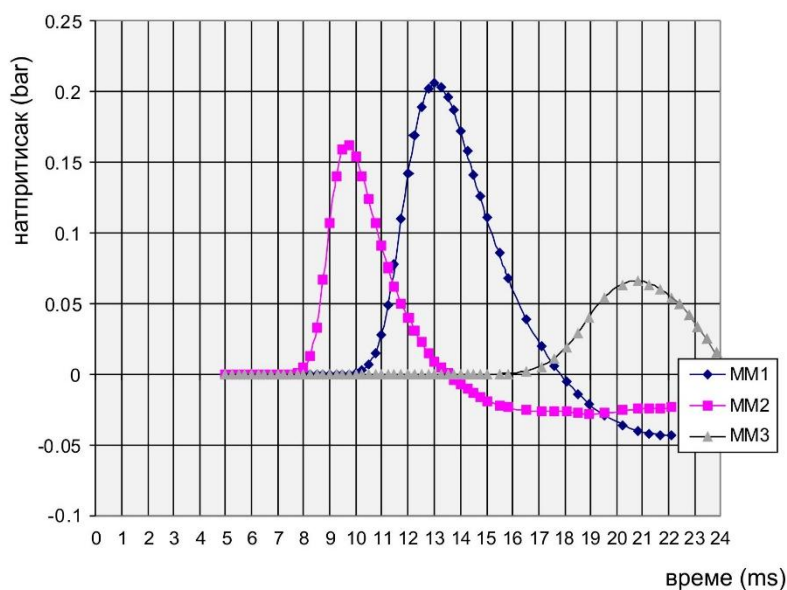
Детаљан приказ прорачуна карактеристичних величина гасне струје (Маховог броја, густине, притиска и концентрације барутних гасова) дат је на дијаграмима у Прилозима 1.1 – 1.4.



Дијаграм 6.4 - Гасодинамички прорачун (2D), карактеристичне величине гасне струје, за случај опаљења из МБ 120mm М95 (цев са цилиндричним наставком) са мином 120 mm М62П6 ЛТФ

а) Гасодинамички прорачун (2D), цев са дивергентним наставком (млазником)

Други случај гасодинамичког прорачуна, којим су израчунате вредности натпритиска, приказане у функцији времена, за карактеристична места: 1, 2 и 3, у случају гађања из МБ 120 mm М95, цев са дивергентним наставком (млазником) са мином 120mm М62П6 ЛТФ, дате су на дијаграму 6.5.



Дијаграм 6.5 – Гасодинамички прорачун (2D), резултати натпритиска барутних гасова, дати у функцији времена и израчунати за карактеристична места: 1, 2 и 3, за случај опаљења из МБ 120 мм М95 (цев са дивергентним млазником) са мином 120 мм М62П6 ЛТФ

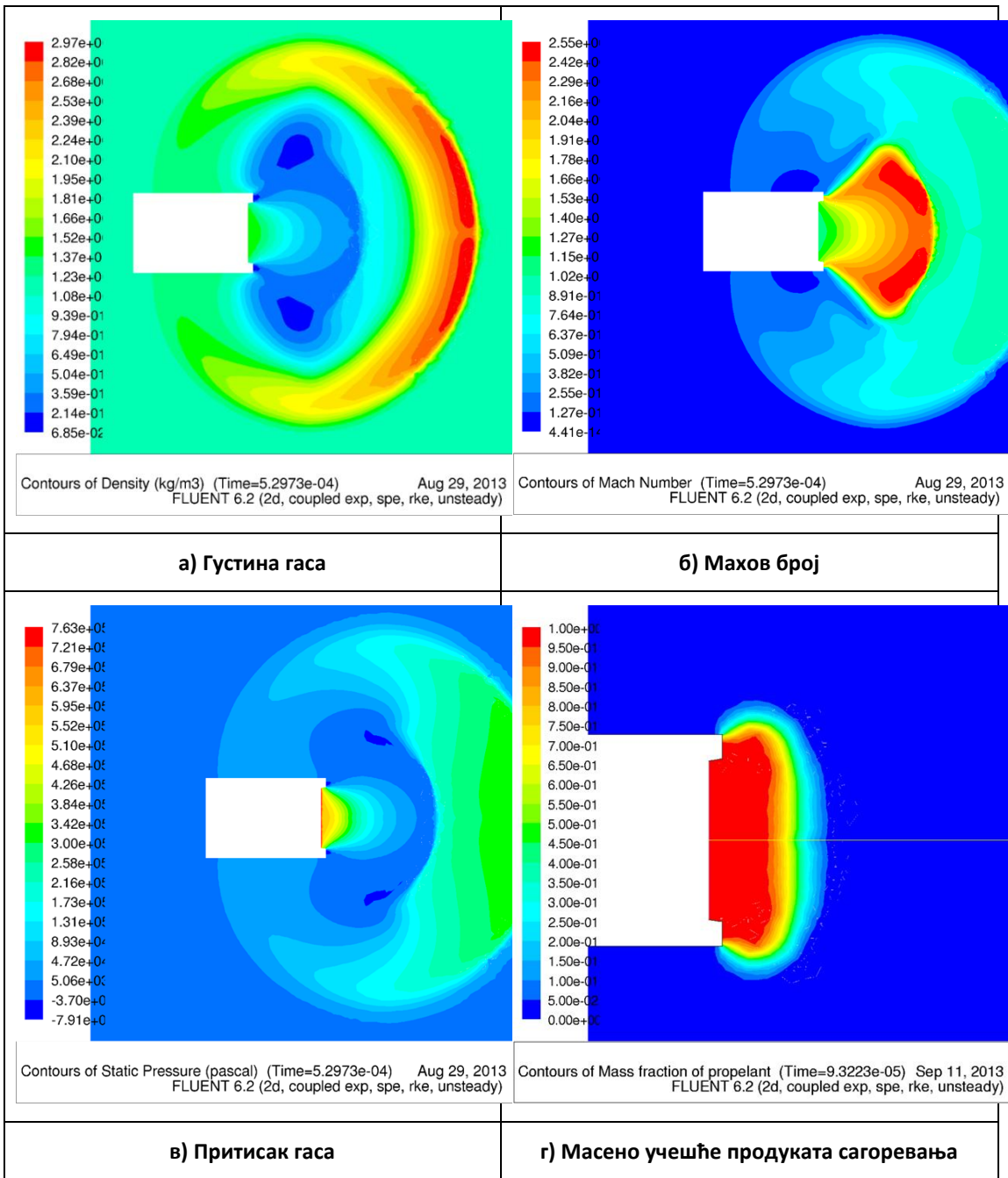
Слично као у случају 2D прорачуна, који се односи на цев са цилиндричним наставком и на овим резултатима гасодинамичког прорачуна, приказаним на Дијаграму 6.5, у почетној фази $p(t)$ криве, уочава се нагли скок притиска, који је карактеристичан за појаве интензивног истицања барутних гасова, након изласка пројектила из цеви, а јавља се у тренутку наиласка ударног таласа УТ преко разматране тачке у простору око оруђа. Нагли пораст притиска је посебно изражен на ближим растојањима у односу на уста цеви (извор поремећаја), што се јасно уочава на $p(t)$ дијаграмима, датим за тачке 1 и 2. Такође се уочава да након почетне фазе натпритиска, наступа друга фаза, коју карактерише потпритисак значајно мањег интензитета и која се након извесног времена по вредности притиска изједначава са околним ваздухом. У овом случају добијени дијаграми промене притиска, указују да дивергентни наставак, који се поставља на уста цеви умањује "бласт ефекат" у зони карактеристичних тачака прорачуна, односно добијене вредности максималног натпритиска су значајно умањене, а упоредне вредности су дате у Табели 6.3. Ово је разумљиво јер је почетна вредност притиска барутних гасова на излазном пресеку дивергентног млазника мања него код цилиндричног наставка. У овом случају су такође добијене мање брзине ударног

таласа, тако да за тачку 2, која је удаљена 4 m улево, у односу на уста цеви, брзина УТ износи 404 m/s. Након тога УТ наилази на тачку 1, која се налази на растојању од 5,66 m и под углом је од 45° , у односу на уста цеви, за ову тачку брзина УТ износи 435 m/s. Затим УТ наилази на тачку 3, која се налази на растојању од 8 m и под углом је од 90° , у односу на уста цеви, за ову тачку брзина УТ износи 385 m/s. Највећа брзина УТ се остварује у чеоном делу струје барутних гасова која у тренутку $t = 0,867 \text{ ms}$ достиже највећу вредност од 2,78 М (Прилог 1.6). На овим дијаграмима се учава да је време достизања максималног притиска, односно наиласка УТ на посматраним тачкама дуже, односно ова појава је нешто спорија у односу на претходни случај, са цилиндричним наставком.

У овом случају се уочава да је појава ширења УТ у бочним правцима изражајнија, у односу на претходни случај са цилиндричним наставком на цеви. Објашњење ове појаве може се наћи у дивергентном наставку који се шири са полууглом експанзије од 9° и на тај начин делимично скреће гасну струју бочно у односу на подужни правац струјања. Ова појава се може уочити на дијаграмима из Прилога 1.6 и 1.8.

Карактеристичне величине гасне струје, за случај опаљења из МБ 120 mm М95 (цев са дивергентним млазником), са мином 120 mm М62П6 ЛТФ, дате су за тренутак времена око 0,6 ms, после изласка мине из цеви и приказане су на дијаграму 6.6 (а, б, в и г).

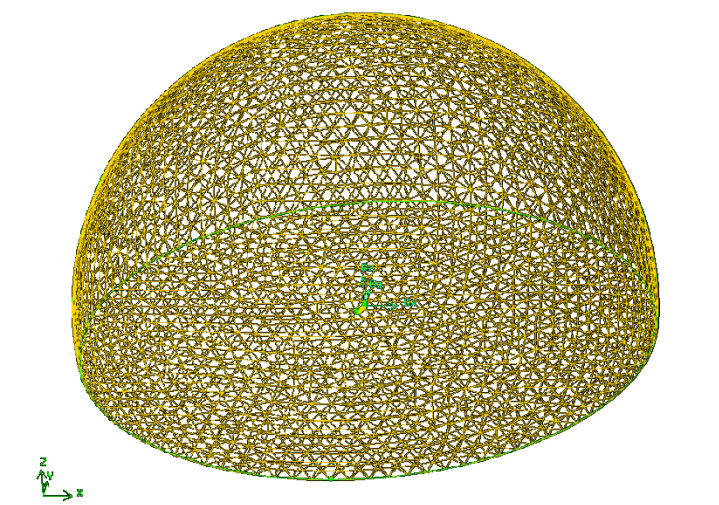
Детаљан приказ прорачуна карактеристичних величина гасне струје (Маховог броја, густине, притиска и концентрације барутних гасова) приказан је на дијаграмима који су дати у Прилозима 1.5 – 1.8.



Дијаграм 6.6 - Гасодинамички прорачун (2D), карактеристичне величине гасне струје, случај опаљења из МБ 120 mm M95, цев са дивергентним наставком (млазником) са мином 120mm M62П6 ЛТФ

6.2.2. Тродимензионална (3D) нумеричка симулација

Као следећи корак у истраживању направљен је 3D модел за нумеричку симулацију. Овај модел је укључивао и утицај рефлексije ударног таласа од тло, а почетна неструктурисана мрежа се састојала од 367.095 тетраедара и приказана је на Сл. 6.2. Такође, на Сл. 6.3. приказана је запреминска мрежа на устима цеви, која је коришћена у предметној 3D нумеричкој симулацији.



Слика 6.2 - Запреминска мрежа у целом нумеричком домену за 3D нумеричку симулацију

Нумеричка симулација у 3D није показала задовољавајуће резултате. На свим карактеристичним местима вредности натпритиска су биле за ред величине мање од измерених. Ово је указало да примењени софтвер и поред коришћења адаптивних мрежа, не може довољно тачно да одреди положај и јачину ударног таласа у 3D, а што је такође потврђено у [49] где је коришћен исти софтвер.

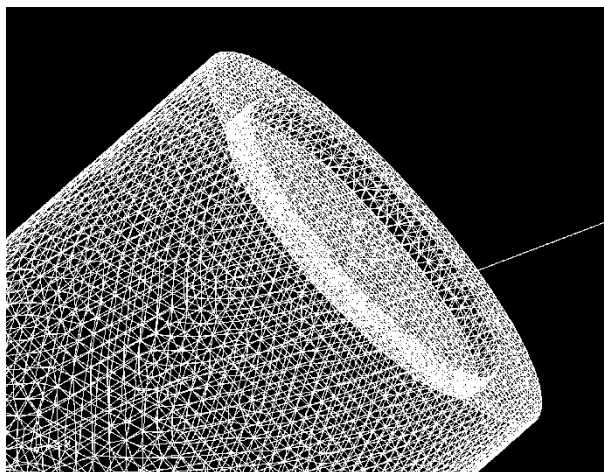
С обзиром да не постоји универзални критеријум за тачну нумеричку детекцију ударних таласа у 3D, у [49] је развијен метод за идентификацију ударног таласа под називом Blast Wave Identification Parameter (BWIP).

Ова модификација је заштићена у САД патентом означеним са # 60/944,612, од 18.06.2007. године [50], а унета је у софтвер ANSYS FLUENT преко такозваних функција које дефинише корисник, односно Users Defined Functions (UDF). Ове

функције представљају програме писане у језику C, а у софтверу ANSYSFLUENT се врши њихова компилација и линковање.

У методи BWIP полази се од услова да интензитет Маховог броја у правцу нормале испред ударног таласа мора да буде већи од један и овај услов се користи за одређивање положаја таласа. Како је градијент притиска кроз ударни талас увек нормалан на талас, он служи за одређивање оријентације таласа.

Скаларни производ градијента притиска и Маховог броја у правцу нормале, нормиран са интензитетом вектора градијента притиска, се израчунава у свакој ћелији мреже, и служи као вредност за проверу. Све ћелије мреже у којима је ова вредност већа или једнака један, формирају домен у коме се врши фино одређивање положаја и оријентације ударног таласа.



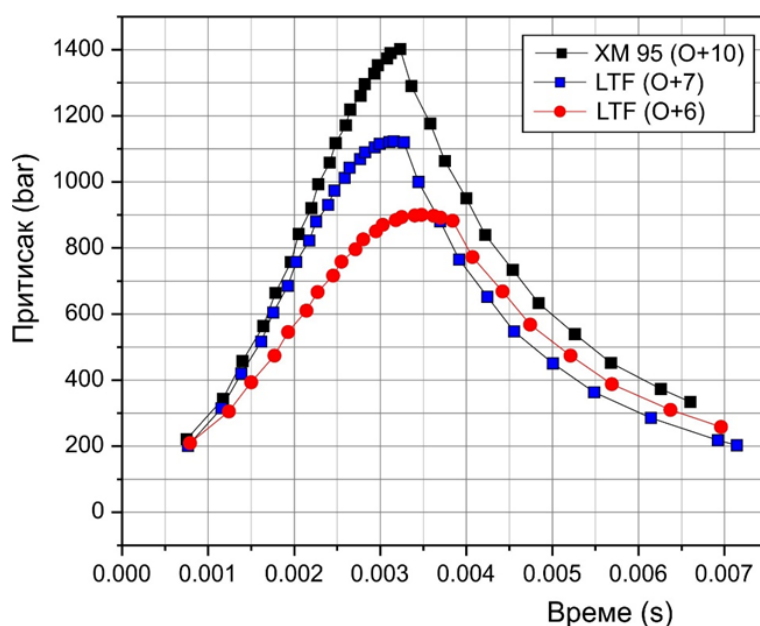
Слика 6.3- Запреминска мрежа на устима цеви за 3D нумеричку симулацију

6.3. Унутрашњебалистички прорачуни

У складу са опитима који су планирани да се изврше у циљу експерименталне провере прорачунских резултата, урађени су и одговарајући унутрашњебалистички (УБ) прорачуни. Прорачуни су урађени за случај гађања из новог минобацача 120 mm M95 са лаком тренутно фугасном мином 120 mm ЛТФ М62П6 и торментачним барутним пуњењем (О+7) и новом мином повећаног домета и ефикасности 120 mm ХМ95 и барутним пуњењем (О+10).

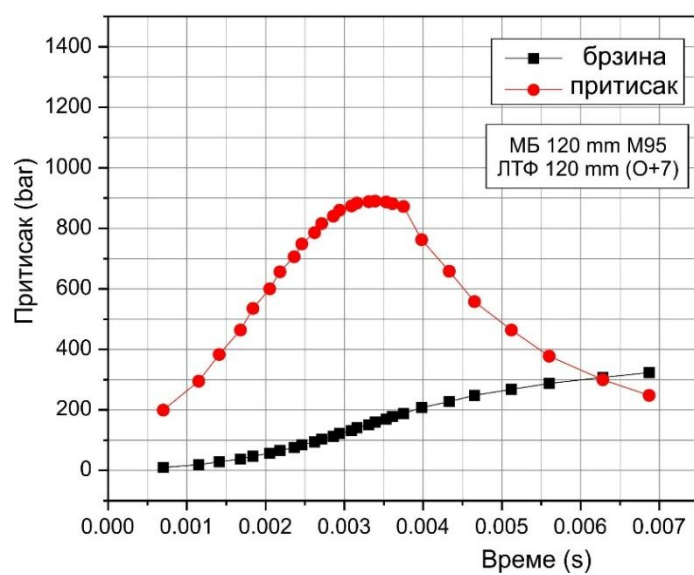
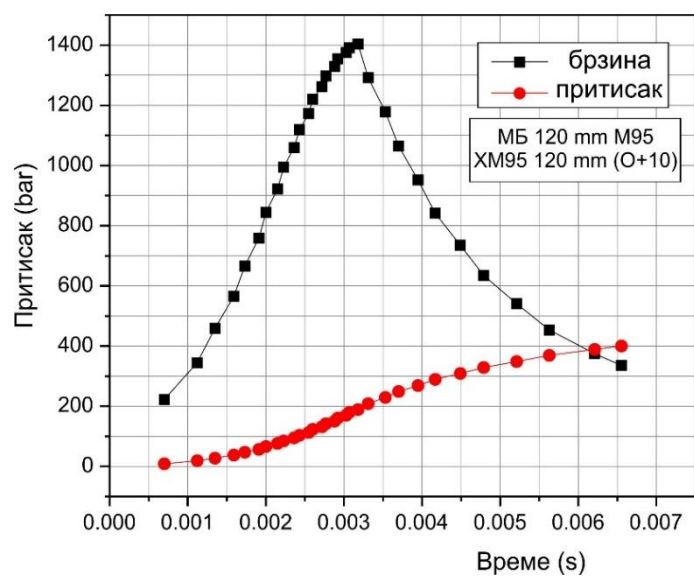
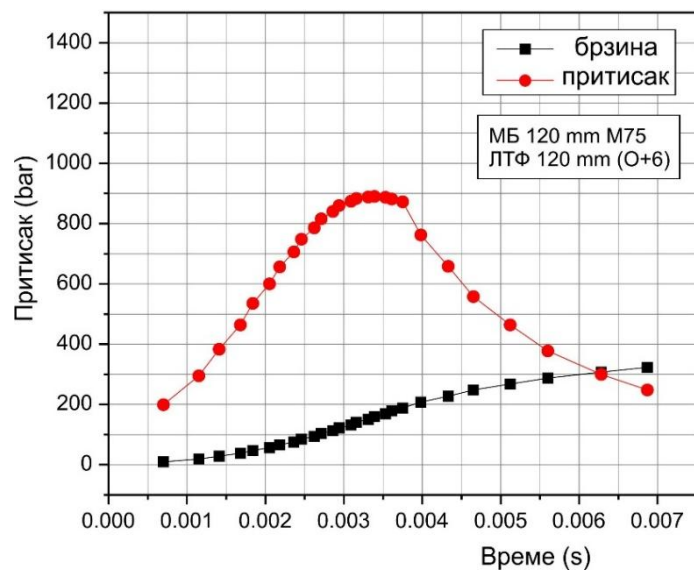
Као контролна група коришћена је мина 120mm ЛТФ М62П6 са барутним пуњењем (О+6) и гађана је из минобацача 120 mm М75.

УБ прорачуни су урађени за три наведена случаја, при чему је коришћено програмско решење за минобацачке системе, по упрошћеној методи Сребрјакова. Криве притиска у функцији времена $p(t)$, односно нумерички прорачуни притиска за ова три наведена примера дати су упоредно на Дијаграму 6.7.



Дијаграм 6.7–Упоредни приказ промене притиска у цеви минобацача за случај гађања са мином 120 mm ЛТФ из минобацача М75 (О+6) и М95 (О+7) и (О+10)

Ови дијаграми показују очекивано повећање максималног притиска барутних гасова у цеви минобацача (p_m), које је посебно изражено код минобацачке мине М95 и највећег барутног пуњења (О+10). Поред жењеног повећања почетне брзине која достиже вредност од 400 m/s (Дијаграм 6.8-б), овде су изражени и неповољни "бласт ефекти", који су у највећој мери проузроковани повећањем вредности притиска барутних гасова и већом количином барутних гасова који истичу из цеви. Појединачни резултати УБ прорачуна, односно графички приказ промене притиска барутних гасова $p(t)$ и брзине мине $v(t)$, дати су на Дијаграмима (6.8 - а, б, и в).



Дијаграм 6.8 (а, б и в) – Приказ резултата УБ прорачуна 3.1, 3.2 и 3.3 (Прилог 3)

На приказаним Дијаграмима 6.8 (а, б, и в) се види да је време трајања УБ процеса уједначено и да износи око 6 ms. Такође се уочава значајно повећање почетне брзине минобацачке мине 120 mm ХМ95, са барутним пуњењем (О+10), која је тежа за око 3 kg од стандардне мине М62П6, што за последицу има повећање максималног притиска барутних гасова у барутној комори и на устима цеви.

Овде треба напоменути да се оптимално УБ решење постиже са барутом истог састава и две различите геометрије барутног зрна. На овај начин се остварује потпуно и поуздано сагоревање са мањим барутним пуњењима. За мину 120 mm ЛТФ коришћено је стандардно барутно пуњење, у конфигурацији (О+6), односно (О+7) торментачно. Основни подаци за УБ прорачуне су дати у Табели 6.4.

Табела 6.4 – Улазни подаци за унутрашњебалитичке прорачуне

	Минобацач 120 mm	М75	М95	М95
	Мина120 mm	М62П6	М62П6	ХМ95
	Барутно пуњење	(О+6)	(О+7)	(О+10)
KU	маса мине [kg]	12,6	12,6	15,6
OMEGA0	маса барута основног пуњења [kg]	0,032	0,032	0,040
OMEGA	маса барута допунског пуњења [kg]	0,456	0,532	0,810
LU	пут мине у цеви [m]	1,085	1,385	1,270
S	површина попречног пресека цеви [m ²]	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$
SPRIM	површина попречног пресека мине [m ²]	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$
KSI	коэффициент процепа	0,607	0,607	0,800
WO	запремина барутне коморе [m ³]	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$4,07 \cdot 10^{-3}$
FI	коэффициент фиктивности	1,0	1,0	1,0
F0	сила барута основног б/п [kgdm/kg]	830000	830000	830000
F	сила барута допунског б/п [kgdm/kg]	1130597	1130597	1130597
DEL	густина ба рута [kg/m ³]	1,6	1,6	1,6
ALFA0	коволумен барутних гасова [dm ³ /kg]	0.91	0.91	0.91
U1	коэффициц. брзине сагоревања барута	$0,122 \cdot 10^{-4}$	$0,122 \cdot 10^{-4}$	$0,122 \cdot 10^{-4}$
E1	дебљина свода барутног зрна [m]	$0,26 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-3}$	$0,31 \cdot 10^{-3}$
K	однос C _p /C _v барутних гасова	1,24	1,24	1,24

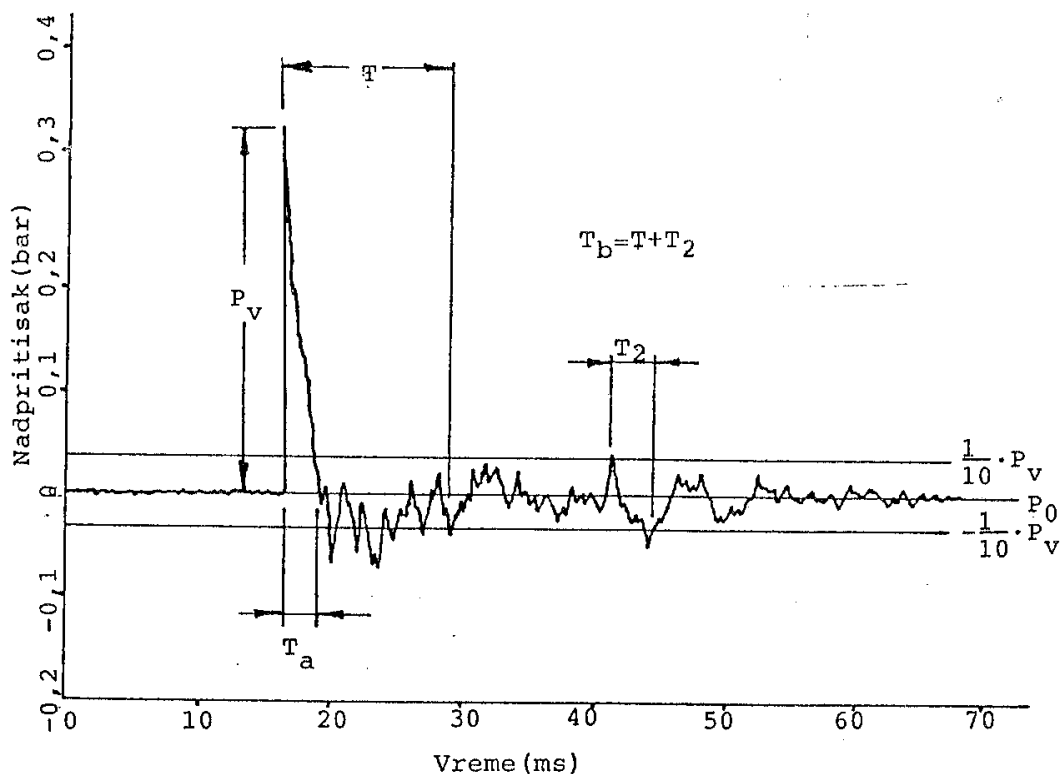
7. МЕТОДОЛОГИЈА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА И МЕРЕЊА

Појава која се снима и идентификује, преко карактеристичних параметара, је **ударни талас**, који се јавља око оруђа и представља облик надзвучног таласног кретања у ваздуху. Ударни талас настаје као последица наглог истицања барутних гасова, по изласку пројектила из цеви и карактерише се уским фронтом ударног таласа (дебљине $\sim 10^{-5}\text{mm}$) при чему долази до наглог повећања притиска, густине и температуре средине и смањења брзине и Маховог броја.

Вршни натпритисак (P_v), ваздушног ударног таласа [51] и [52], представља највећу вредност натпритиска и приказан је на Сл. 7.1.

"А" трајање ваздушног ударног таласа (T_a), је период времена у току којег натпритисак ваздушног ударног таласа порасте од вредности атмосферског притиска околине (P_o) до вршне вредности (P_v), а потом се опет врати на вредност атмосферског притиска.

"Б" трајање ваздушног ударног таласа представља збир времена трајања основног импулса натпритиска и времена трајања накнадних значајних промена натпритиска око вредности атмосферског притиска околине ($T_b = T + T_2$).



Сл. 7.1 – Дијаграм натпритиска ваздушног ударног таласа, са карактеристичним величинама натпритиска и времена трајања

Трајање основног импулса натпритиска (T) је период времена од почетка деловања натпритиска ваздушног ударног таласа до момента када се ниво натпритиска устали око вредности атмосферског притиска у опсегу $\pm 1/10$ вршног натпритиска, Сл. 7.1.

Накнадне значајније промене (T_2), натпритиска ваздушног ударног таласа, су оне чији ниво прелази вредност атмосферског притиска околине, за више од $\pm 1/10$, вршног натпритиска, а укупно трајање им је веће од 10% трајања основног импулса натпритиска, приказано је на Сл. 7.1. Накнадни импулси притиска, мањи по интензитету и трајању од основног импулса, су најчешће последица рефлектујућих ударних таласа који се одбијају од тло или друге објекте у околини мерног места.

Натпритисак ваздушног ударног таласа се мери у паскалима [Pa] или барима [bar], а може се прерачунати у интензитет буке, изражен у децибелима [dB]. За прерачунавање вредности натпритиска користи се следећи образац:

$$P (dB) = 20 \cdot \log \frac{P(Pa)}{P_0(Pa)}$$

Као референтни ниво (0 dB) за прерачунавање вредности натпритиска ваздушног ударног таласа P [Pa] у децибеле, усвојена је вредност притиска $P_0=20 \mu Pa$.

7.1. Опис мерне методе и поставка мерења

Ваздушни ударни талас (претходни) око оруђа се јавља као пратећа појава приликом испаливања пројектила надзвучном брзином. У основи се идентификују два ударна таласа, први је проузрокован надзвучним кретањем самог пројектила, односно стуба ваздуха који пројектил потискује крећући се кроз цев. Други талас настаје наглим истицањем барутних гасова, приликом изласка пројектила из цеви. Притисак у цеви, при изласку пројектила може да има вредност од неколико стотина бара. Нагла експанзија ослобођених барутних гасова изазива формирање доминантног ударног таласа.

Мерна места у простору око оруђа, постављају се на различитим позицијама у зависности од испитиваног оруђа и потреба мерења. Приликом дефинисања распореда мерних места треба имати у виду положаје које посада оруђа заузима током гађања. На Сл. 7.2 дат је положај посаде вученог минобацача, током гађања.



Сл. 7.2 – Приказ могућег положаја посаде минобацача током гађања

Уколико се мери ниво натпритиска, ради сагледавања утицаја на посаду, тада мерна места одговарају позицији коју заузимају чланови посаде оруђа током

гађања. Некада мерења имају за циљ да утврде ниво натпритиска ради процене његовог утицаја на суседна оруђа и другу опрему и уређаје који се налазе у близини. У неким случајевима се распоред мерних места организује тако да се мерењем потврде, односно верификују, вредности које су добијене прорачуном на бази предложеног модела симулације, што је у највећем делу примењено и у овом раду.

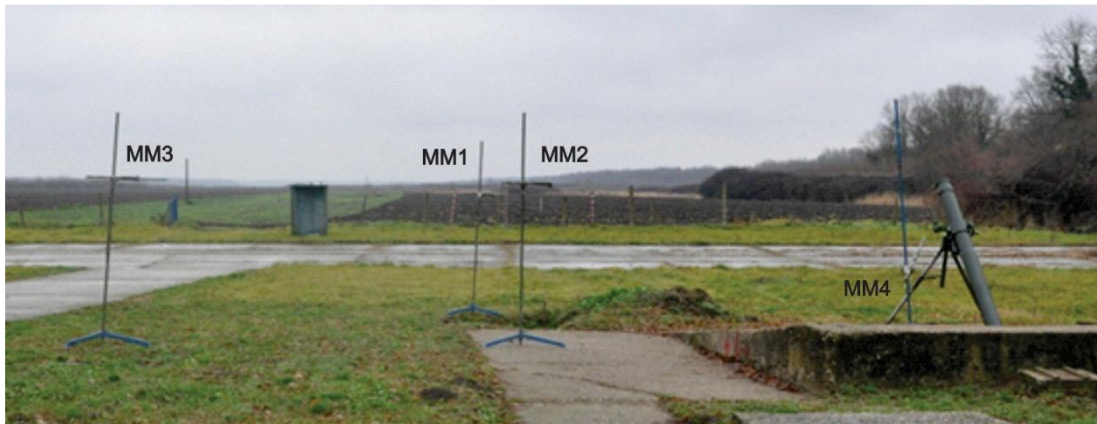
На Сл. 7.3 приказана је минобацачка цев калибра 120 mm, на коју је постављен цилиндрично-дивергентни наставак са пиезо давачима за мерење притиска у улазном и излазном пресеку наставка на мерним местима М1 и М2. Коришћени су давачи притиска "Kistler" тип 6031, следећих карактеристика: опсег мерења (0-250 bar), резолуција (0,002 bar), осетљивост (14 pC/bar). Поред цеви, на висини 0,8 m, на вертикалном носачу постављен је давач за мерење натпритиска, који је усмерен према устима цеви.



Сл. 7.3—Приказ постављања сонде за мерење натпритиска на месту нишанције, непосредно уз цев минобацача, мерно место ММ4

Пример поставке мерења у циљу утврђивања утицаја натпритиска ударног таласа, барутних гасова, приликом извођења опита гађањем из минобацача 120 mm М95, дат је на Сл. 7.4а. Положај постављених давача за мерење натпритиска одговара распореду мерних места ММ1 – ММ4 (Сл. 6.1 и .Сл. 7.4а). Давачи на мерни местима (ММ1, ММ2 и ММ3), су усмерени у правцу извора поремећаја (уста цеви) и налазе се у висини ватрене линије (уста цеви). Давач на мерном месту ММ4 постављен је

на висини 0,8 m, лево 0,6 m у односу на осу цеви (Сл. 7.3). За мерење натпритиска су коришћени давачи произвођача "PCB-Piezotronics", модел 137А.



Сл. 7.4а - Распоред сонди за мерење натпритиска, приликом гађања из минобацача 120 mm M95.

На Сл. 7.4б приказан је минобацач великог домета 120 mm M95 и мина великог домета 120 mm XM95, са којима су вршена испитивања гађањем.



Сл. 7.4б - Минобацач 120 mm M95 и мина 120 mm XM95

Опис елемената у мерном ланцу

Формирање система за мерење и прикупљање података захтева познавање: природе податка и карактеристике елемената система. На основу овога саставља се систем који обезбеђује верно прикупљање података и њихово трајно меморисање ради касније обраде. Блок шема за мерење и прикупљање података је дата на Сл.7.5.



Сл. 7.5 – Блок шема мерног ланца

Где су:

- ПП, претварач притиска,
- КВ, коаксијални вод,
- ПЈ, посредна јединица,
- НП, носач података.

Претварач притиска

Претварач притиска има задатак да верно репродукује физичку појаву како амплитудно тако и фреквентно. Поред тога мора добро да подноси потресе, велика убрзања, ниске и високе температуре, односно да је његова осетљивост на ове појаве мала, такође мора да има високу осетљивост на притисак. Због наведених особина сматра се да је претварач један од најважнијих елемената мерног система, јер од његових особина зависи квалитет мерења.

Претварач притиска, функционише на бази пиезоелектричног ефекта и када на њега делује притисак (p), кристал кварца се под дејством притиска деформише у границама еластичних деформација и на површинама кристала настаје наелектрисање (Q). Ова појава се означава као директни пиезоелектрични ефекат. Настало наелектрисање зависи искључиво од деформације кристала односно од напрезања које је изазвало деформацију, а не и од брзине којом је ова деформација настала. Претварачи са пиезо-ефектом спадају у активне претвараче због тога што им није потребан никакав помоћни извор напона. Пиезо претварачи су погоднији за мерење динамичких притисака него статичких притисака, јер се код статичких мерења кондензатор у повратној грани појачавача наелектрисања празни преко отпорника који му је везан паралелно, тако да напон на излазу појачавача може опасти толико да је мерење нерегуларно. Зато је при статичким мерењима потребно водити рачуна о дужини мерења и величини временске

константе (она се мења променом кондензатора и отпора у повратној грани), као и о томе да је пре сваког мерења потребно ресетовати излаз појачавача наелектрисања на нулу чиме се губи претходна вредност на излазу.

Коаксијални вод

Водови служе за пренос електричне енергије од извора до потрошача, у нашем случају за пренос сигнала од мерног претварача или од посредне јединице носача података.

Пренос сигнала треба да се изврши са минималним губицима и минималним изобличењима. За мерење притиска употребљава се коаксијални вод са BNC прикључницама на својим крајевима. Коаксијални вод се састоји од спољашњег и унутрашњег проводника.

Спољни проводник је бакарни ширм и цевастог је облика, а унутрашњи пролази кроз центар спољашњег. За разлику од осталих водова коаксијални вод је несиметричан. Несиметрија се огледа у томе што се електромагнетно поље, затворено у међупростору између спољашњег и унутрашњег проводника, ствара само услед струје унутрашњег проводника, док струја спољашњег проводника не ствара унутар вода ни електрично ни магнетно поље.

Струја тече само по спољној површини унутрашњег проводника и по унутрашњој површини спољашњег проводника. Електромагнетно поље коаксијалног вода је оклопљено спољашњим проводником па услед тога нема зрачења нити утицаја спољних поља.

Посредна јединица

У области мерења притисака увек се користи појачавач наелектрисања као посредна јединица између пиезо претварача и носача података.

Излазни напон из појачавача директно је пропорционалан наелектрисању Q , односно мереној величини, у случају ових мерења то је притисак (натпритисак).

Носач података

У систему за мерење и прикупљање података регистратор има задатак даинформацију тј. електрични сигнал пропорционалан физичкој величини запамти - меморише. Овако меморисан сигнал може касније безброј пута да се позива и да се врши његова обрада и анализа.

Као регистратор се користе АД конверторска картица и рачунар. Прво је неопходно да се изврши конверзија аналогног напонског сигнала у дигитални. Ова конверзија се врши помоћу АД конверторске картице да би рачунар могао да прими и сачува у својој меморији мерену величину. Најбитнији параметар при конверзији је учестаност узорковања, која се одређује на основу претходног познавања изгледа мереног сигнала. Пошто је натпритисак функција чији је изглед скоковитог облика потребна је учестаност узорковања од најмање 50 KHz, а пожељно је да буде и већа.

Када се измерени натпритисак сачува на рачунару, накнадно је могуће вршити његову даљу обраду у зависности од захтева корисника.

7.2. Предмет и циљ експерименталних испитивања

Предмет испитивања је био прототип минобацача великог домета 120 mm M95 са мином 120 mm M95. Циљ испитивања је био да се утврди утицај уређаја, који се постављају на уста цеви, на ниво натпритиска ударног таласа, који се јавља око минобацача и његов утицај на понашање система минобацач-мина.

Поред минобацачке мине 120 mm M95, за део испитивања је коришћена и лака тренутно фугасна мина ЛТФ 120 mm M62П6.

Гађање је вршено са оруђем које је имало уграђену нишанску справу НСБ-5.

Испитане су различите варијанте решења, са и без наставка на цеви минобацача, а према прегледу датом у табели 7.1.

Табела 7.1 – Преглед варијанти решења цев-наглавак минобацача М95

Варијанта Решења	Дужина цеви (mm)	Дужина уређаја (mm)	
		Цилиндар	Млазник
А	1790	-	-
Б	1790	110	-
Ц	1790	60	50/9°
Д	1790	-	100/9°

- А** - основна варијанта цеви без додатног уређаја,
Б - цев са цилиндричним уређајем дужине 110 mm,
Ц - цев са комбинованим уређајем (цилиндрично-дивергентни) дужине 110 mm,
Д - цев са дивергентним уређајем дужине 100 mm.

Приликом испитивања гађањем из минобацача 120 mm М95 са мином 120 mm М95 регистрован је повећан ниво натпритиска ударног таласа, око оруђа, па је циљ овог испитивања била провера утицаја различитих конструкционих решења уређаја, уграђених на уста цеви оруђа, на ниво натпритиска око оруђа, као и његов утицај на систем мина – минобацач [53], [54].

Са различитим конструкционим решењима наставака (цилиндрични, цилиндрично-дивергентни и дивергентни), који се постављају на уста цеви, испитан је њихов утицај на следеће карактеристике:

- ниво натпритиска ударног таласа барутних гасова око минобацача,
- ниво притиска барутних гасова у излазном пресеку наставка /цеви,
- растурање погодака по даљини и правцу,
- величину реактивне силе на подлогу.

Анализом горе наведених карактеристика извршиће се оцена њиховог утицаја на параметре натпритиска око оруђа и избор оптималне варијанте решење, односно предложених конструкционих решења.

7.3. Преглед извршених испитивања

7.3.1. Организација и начин извршења опита

Испитивање гађањем из минобацача 120 mm M95, извршено је на полигону Техничког опитног центра у Никинцима [53].

Због ограничене количине минобацачких мина 120 mm M95, великог домета, испитивања гађањем су обављена са ЛТФ мином 120 mm M62П6 и торментачним барутним пуњењем.

Након одређивања торментачног барутног пуњена испитивање је извршено са пет група мина, по следећем распореду:

- контролна група, гађана је из минобацача 120 mm M75 са ЛТФ мином M62П6 и барутним пуњењем (0+6), без уређаја на устима цеви,
- варијанта "А", гађана је из минобацача 120 mm M95 са ЛТФ мином M62П6 и торм. барутним пуњењем (0+7), без уређаја на устима цеви,
- варијанта "Б", гађана је из минобацача 120 mm M95 са ЛТФ мином M62П6 и торм. барутним пуњењем (0+7), са цилиндричним уређајем на устима цеви,
- варијанта "Ц", гађана је из минобацача 120 mm M95 са ЛТФ мином M62П6 и торм. барутним пуњењем (0+7), са цилиндрично-дивергентним уређајем на устима цеви,
- варијанта "Д", гађана је из минобацача 120 mm M95 са ЛТФ мином M62П6 и торм. барутним пуњењем (0+7), са дивергентним уређајем (млазником) на устима цеви.

Анализиране варијанте решења: **А**, **Б**, **Ц** и **Д**, испитане су гађањем из прототипа минобацача 120 mm M95 са ЛТФ мином M62П6 и (0+7) барутним пуњењем (торментачним). Контролна група је испалена из минобацача 120 mm M75 са ЛТФ мином M62П6 и (0+6) барутним пуњењем, са циљем да се упореди ниво натпритиска ударног таласа око оруђа МБ М75, које се налази у наоружању Војске Србије, са предложеним варијантама решења новог минобацача великог домета 120 mm M95 ВД.

7.3.2. Испитивања гађањем

Испитивања гађањем су започела након одређивања масе торментачног барутног пуњења за ЛТФ мину 120 mm М62П6. Прописана вредност торментачног притиска барутних гасова износи $P_{m\text{ torm.}} = 1032 - 1106 \text{ bar}$. Торментачни притисак барутних гасова остварен је са барутним пуњењем 0+7, при чему су барутна пуњења лаборисана, екструдовано-импрегнираним (ЕИ) барутима, на следећи начин:

Основно пуњење:

Барут ЕИ-161 (серијска производња), маса $\omega_0 = 36,5 \text{ g}$.

Допунско пуњење:

Барут ЕИ-261 (серијска производња), маса $\omega = 7 \times 81,8 \text{ g}$.

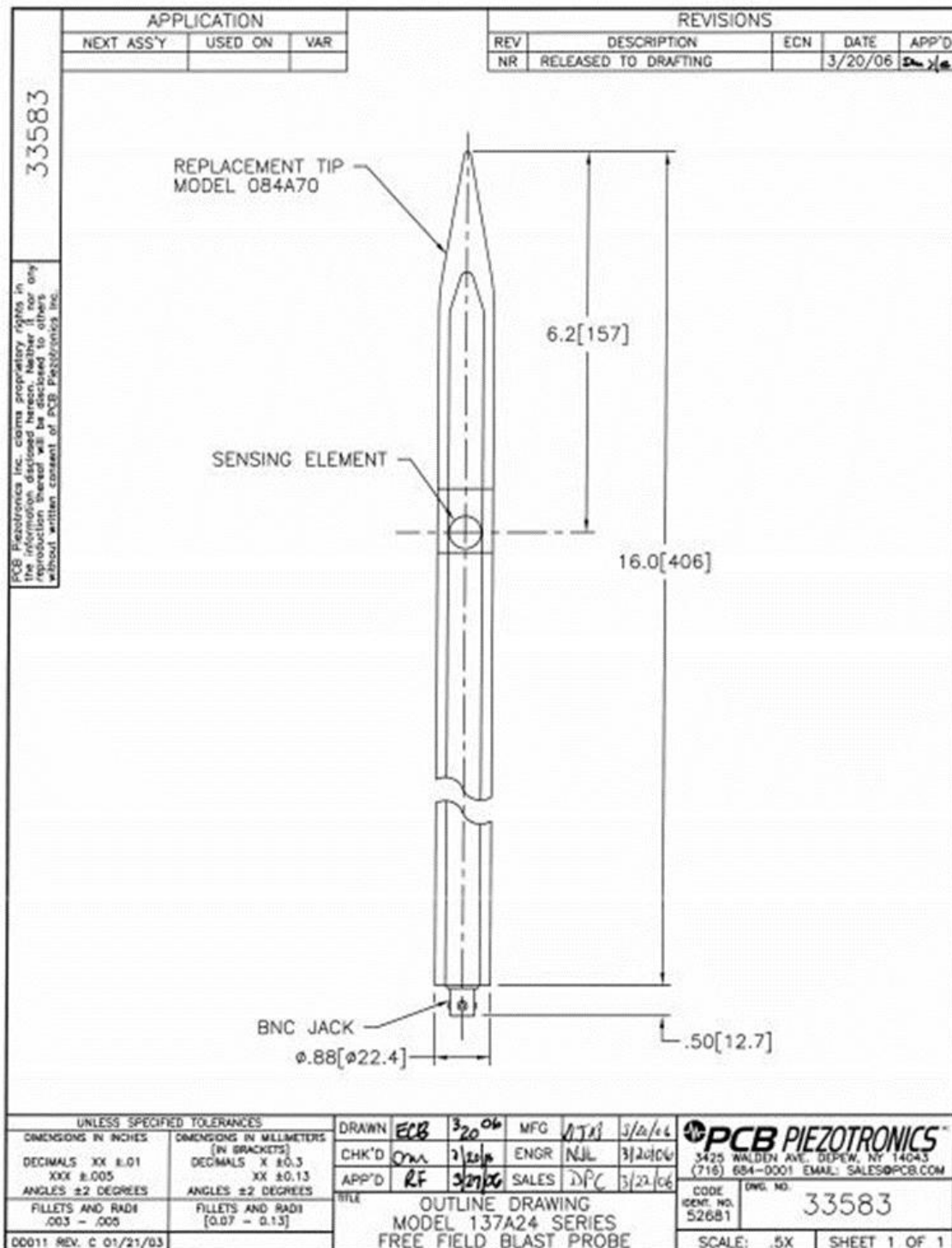
Приликом испитивања мерене су следеће величине:

- највећи притисак барутних гасова у цеви P_m (крешер $\varnothing 6,18 \text{ mm}$ / бакарни ваљчић $\varnothing 3 \times 4,9 \text{ mm}$),
- почетна брзина на устима цеви V_0 (радар BS-850 "OPOS"),
- највећи домет X_m ,
- растурања пројектила по даљини и правцу V_d и V_p ,
- притисак на устима цеви, на два мерна местана (M1 и M2), мерен је са "Kistler" пиезо сондом тип 6031,
- натпритисак ударног таласа око оруђа, мерен је на четири мерна места (MM1 – MM4), по шеми мерења датој на Сл. 7.4а, при чему су коришћени сензори, произвођача "PCB – Piezotronics", модел 137А, опсега мерења до 17,27 bar. Техничке карактеристике и димензије сензора дате су у Табели 7.2 и на Сл. 7.6.
- померање огрлице по цеви [mm],
- померање подлоге у назад [mm],
- утапање подлоге [mm],
- провера погодности пуњења оруђа,
- визуелно праћење понашања оруђа и његових склопова при опаљењу и

- одступање на поделама нишанске справе пре и после сваког појединачног опаљења.

Табела 7.2. – Техничке карактеристике сензора "PCB - Piezotronics", модел 137A

	Dynamic Range (1)	psi	0.05 to 50	0.1 to 500	1 to 1000
	MODEL NUMBERS		137A23	137A22	137A21
AMPLITUDE	Sensitivity (5)	mV/psi	100	10	1
	Resolution	psi	0.005	0.01	0.1
	Range (for 5V output)	psi	50	500	1000 (1V)
	Range (for 10V output) (2)	psi	100	1000	5000 (5V)
	Maximum Pressure	psi	1000		5000
Linearity (3)	%FS				≤ 1
FREQ RESP	Resonant Frequency	kHz	≥ 500		
	Rise Time (incident)	μs	≤ 4		
	Discharge Time Constant (4)	sec	≥ 0.2		
ENVL	Temperature Range	°F	-100 to +275		
	Temperature Coefficient	%/°F	≤ 0.03		
ELECTRICAL	Polarity (positive pressure)		positive		
	Output Impedance	ohm	≤ 100		
	Output Bias	+volts	8 to 18	8 to 14	
	Power Required: Voltage	+VDC	20 to 30		
	Constant Current	mA	2 to 20		
PHYSICAL	Sensing Element	material	quartz		
	Probe Case	material	aluminum alloy		
	Diaphragm (sensing element)	material	Invar		
	Connector	type	BNC jack		
	Sealing	type	epoxy		
OPT	Water-resistant Cable	prefix	W (specify length)		

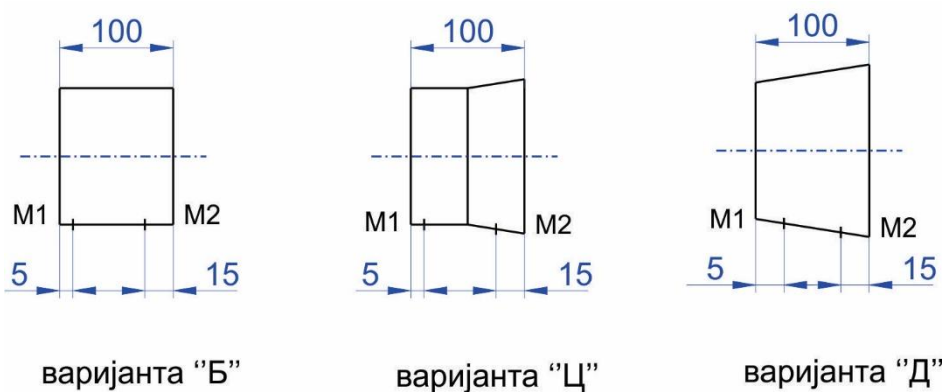


Сл. 7.6 - Цртеж и димензије сензора "PCB – Piezotronics", модел 137A

7.4. Преглед резултата испитивања

7.4.1. Испитивање са минобацачем 120 mm M95 и мином M62П6

Испитивање је извршено гађањем из прототипа минобацача 120 mm M95, са пет група мина, које су дефинисане у тачки 7.4.1, са средње тврдог тла. После сваке испалене групе вршена је промена ватреног положаја и хлађење цеви.



Сл.7.7 – Положај мерних места за мерење притиска барутних гасова на устима цеви (на наставку)

Минобацач је постављен на ватрени положај сходно захтевима прописаним у техничком упутству ТУ-І, 111 (за лаки минобацач ЛМБ 120 mm M74 и M75). Припадајућа мерна опрема је постављена у складу са ранијим искуствима, стеченим приликом провере натпритиска ударног таласа, током модернизације и развоја артиљеријских система 105 mm и 122 mm, уважавајући специфичности које се односе на разматрани минобацачки систем великог домета 120mm M95.

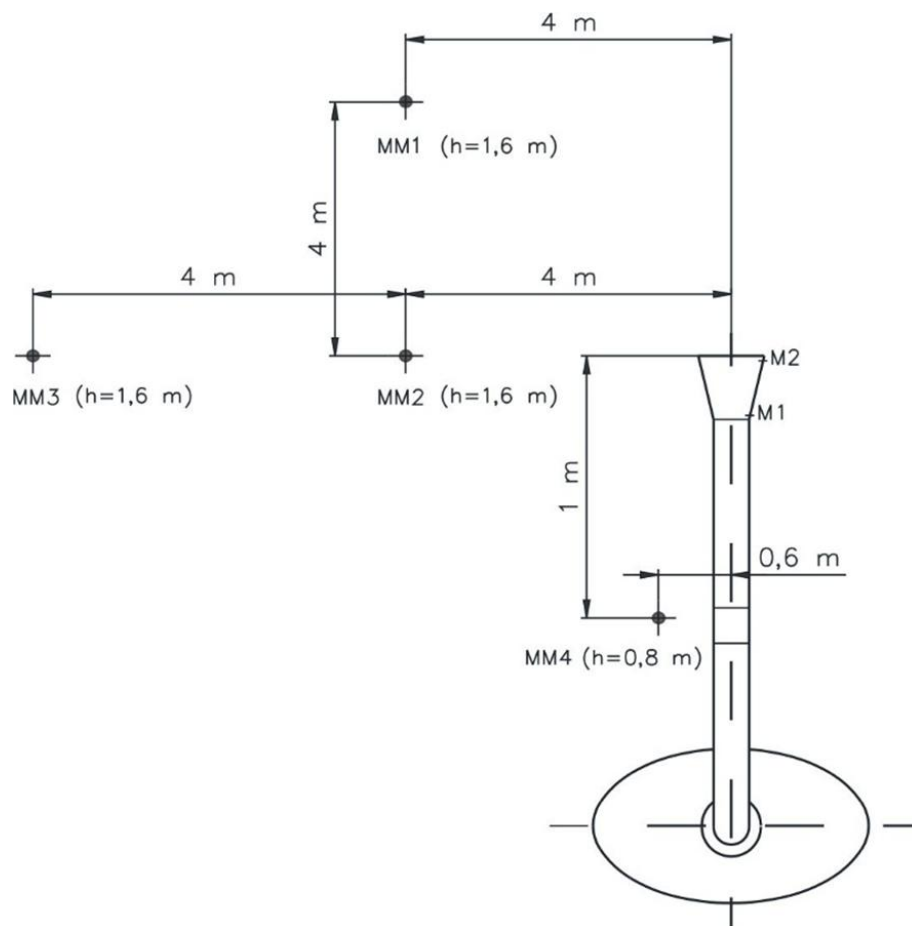
Резултати испитивања дати су у табелама 7.2 и 7.3 и дијаграмима натпритиска, око оруђа, (Прилог 2). У прве две колоне табеле 7.2 дате су измерене вредности притиска барутних гасова у наставку постављеном на уста цеви, мерна места M1 и M2, приказаним на слици Сл.7,7. Положај мерних места натпритиска око оруђа, у току гађања из МБ 120 mm M95 са ЛТФ мином 120 mm M62П6 приказан је на слици Сл.7.8. [55].

У табели 7.3 приказане су измерене вредности натпритиска на карактеристичним мерним местима као што је дато на Сл. 7.8. Мерна места 1, 2 и 3, постављена су на висини $h = 1,6$ m, у односу на површину тла, што одговара стојећем положају чланова посаде и користе се за оцену утицаја натпритиска на суседна оруђа.

Табела 7.3 – Преглед резултата мерења при гађању из минобацача 120 mm (варијанте решења: А, Б, Ц и Д)

група датум	притисак. [bar]		натпритисак [bar]				P_m	X_m	V_o	Напомена Vd/ Vp [m]
	M1	M2	MM1	MM2	MM3	MM4	Bar	M	m/s	
Контролна група (5.7.2000)	-	-	0,186	0,133	0,042	0,236	920	7006	326,4	(0+6)
	-	-	0,177	0,121	0,047	0,142	902	-	324,6	из 120 mm
	-	-	0,188	0,113	0,053	0,159	876	-	322,4	МБ М75
$\Sigma X_i/n$			0,184	0,122	0,047	0,179	896		324,5	
варијанта"А" " (5.7.2000)	-	-	0,203	0,080	0,054	0,322	1140	7498	369,0	(0+7)
	-	-	0,186	0,086	0,058	0,160	1058	7478	367,7	без наставка
	-	-	0,201	0,079	0,057	0,230	1136	7491	369,6	6,8 / 22,6
$\Sigma X_i/n$			0,197	0,082	0,056	0,237	1111	7489	368,8	
варијанта"Б" " (5.7.2000)	180,9	67,2	0,160	0,109	0,040	0,188	1111	7568	372,6	(0+7)
	217,8	30,9	0,211	0,113	0,043	0,182	1135	7377	374,3	Lc=1790 mm
	146,7	47,5	0,152	0,133	0,057	0,125	1146	7441	373,8	+ цил. 100 mm
	196,8	70,3	0,146	0,091	0,052	0,161	1128	7601	376,6	74,2 / 15,2
	202,9	67,8	0,160	0,115	0,051	0,288	1163	7634	381,5	
$\Sigma X_i/n$	189,0	56,7	0,166	0,112	0,049	0,189	1137	7524	375,8	
варијанта"Ц" " (6.7.2000)	182,7	50,9	0,195	0,092	0,046	0,110	1152	7297	371,5	(0+7)
	188,8	51,1	0,204	0,099	0,040	0,156	1157	7280	369,8	Lc=1790 mm
	222,7	56,2	0,191	0,103	0,043	0,112	1162	7330	373,0	+ цил. 50 mm +
	214,3	64,7	-	0,099	0,047	0,135	1160	7340	374,1	млазник 50mm/9°
	204,2	73,5	0,186	0,106	0,043	0,085	1165	7339	373,6	18,3 / 25,4
$\Sigma X_i/n$	202,5	59,3	0,194	0,100	0,044	0,120	1159	7317	372,4	
варијанта"Д" " (6.7.2000)	82,4	9,9	0,199	0,115	0,055	0,084	1169	7334	370,5	(0+7)
	70,0	15,1	0,198	0,114	0,059	0,120	1172	7291	372,4	Lc=1790 mm
	77,6	13,8	0,170	0,135	0,052	0,100	1157	-	373,8	+ млазник 100 mm/9°
	74,6	11,1	0,191	0,127	0,056	0,123	1154	7403	372,7	
	82,9	9,7	0,155	0,128	-	0,107	1151	7366	372,8	32,1 / 25,4
$\Sigma X_i/n$	77,5	11,9	0,183	0,124	0,055	0,107	1161	7349	372,4	

Мерно место 4, је постављено 600 mm лево од осе цеви и 1000 mm уназад, у односу на уста цеви Ова позиција одговара препорученим вредностима за чућећи положај послужиоца.



Сл.7.8 – Распоред мерних места, за мерење натпритиска око оруђа МБ 120mm М95, гађање са ЛТФ мином 120 mm М62П6

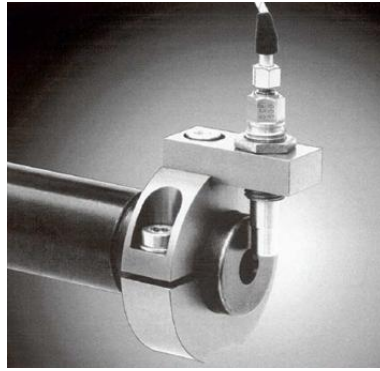
У случају мерења притиска барутних гасова, непосредно по изласку из цеви, могуће је користити уређај за прихват пиезо давача (сонде) као што је приказано на слици 7.9. На овај начин се на опитној цеви, односно цеви оружја, поставља диск са носачем сонде без било какве потребе за дорадом на цеви, односно оружју. Давач притиска се поставља у насач до замишљене линије (изводнице), која прати контуру унутрашње трасе цеви, као што је приказано на слици 7.9.

Током испитивања мерени су подаци који се односе на утапање и померање подлоге и померање огрлице по цеви и дати су у Табели 7.4.

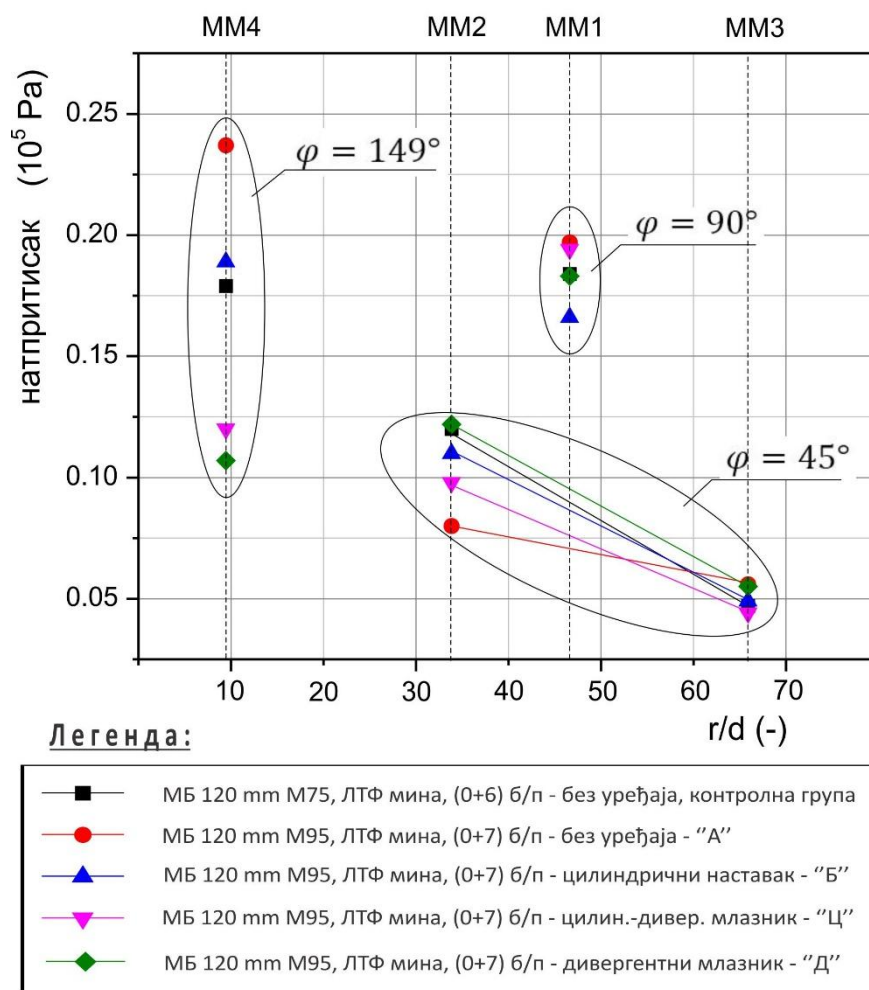
Табела 7.4 – Преглед резултата мерења померања огрлице, утапања и померања подлоге минобацача, при гађању са различитим варијантама решења: А, Б, Ц и Д.

Ред. бр. Опаљења	Испитивана група	Барутно пуњење	Померање огрлице по цеви	Утапање подлоге	Померање подлоге уназад
-	-	-	[mm]	[mm]	[mm]
1	Контролна	О+5	-	-	-
2		О+6	10	0	10
3		О+6	10	20	10
4		О+6	10	10	10
1	А	О+5	120	192	89
2		О+5	23	2	25
3		О+7	63	41	3
4		О+7	2	63	0
5		О+7	2	-1	0
1	Б	О+5	156	223	130
2		О+5	2	0	60
3		О+7	4	1	15
4		О+7	38	2	2
5		О+7	24	41	3
6		О+7	11	10	0
7		О+7	20	10	30
1	Ц	О+5	90	130	100
2		О+5	40	40	0
3		О+7	40	20	20
4		О+7	40	10	10
5		О+7	30	0	0
6		О+7	30	10	0
7		О+7	40	10	0
1	Д	О+5	120	230	140
2		О+5	20	10	10
3		О+7	30	20	30
4		О+7	20	0	0
5		О+7	30	30	50
6		О+7	20	10	0
7		О+7	10	0	0

Прва три мерна места распоређена су на међусобном растојању од по 4 m и служе за праћење нивоа натпритиска у пољу ударног ваздушног таласа, док четврто мерно место представља положај члана послуге у тренутку опаљења. Средње вредности измерених натпритисака, за сваку појединачну групу, приказане су упоредо на дијаграму 7.1.



Сл. 7.9 – Уређај за мерење притиска на устима цеви постављен на опитну цев стрелачког оружја, калибра 7,62 mm



Дијаграм 7.1 –Измерене вредности натпритисак ударног таласа,барутних гасова око минобацача, дате за различите положаје мерних места и за испитане варијанте решења А, Б, Ц и Д

На Дијаграму 7.1 су приказани експериментални резултати са средњим вредностима измерених натпритиска за све испитиване групе пројектила из Табеле

7.3. Резултати измерених натпритисака су дате за карактеристична мерна места ММ1, 2, 3 и 4, у зависности од: односа растојања и калибра (r/d) и угла φ , који заузимају у односу на осу цеви. Ови резултати показују да је највећа вредност натпритиска добијена код гупе пројектила "А", која је испитивана без наставка на устима цеви, док је најмањи интензитет натпритиска на месту нишанције (ММ4), добијен са групом "Д", која је гађана са дивергентним наставком на цеви минобацача, што је очекиван резултат. На дијаграму се такође уочава да се дисперзија резултата смањује са повећањем растојања, што указује на то да је мања разлика у вредностима натпритиска између испитиваних група на већим даљинама, ово је посебно изражено на најудаљенијем мерном месту ММ3, где су разлике измерених вредности натпритиска, по групама, мале. На резултатима који се односе на мерна места ММ2 и ММ3 (угао $\varphi = 45^\circ$) уочава се појава смањења вредности натпритиска са растојањем, при чему су добијене зависности измерених вредности натпритиска скоро колонеарне, изузетак је само једна вредност код групе "А", на мерном месту ММ2, што се може тумачити изменом елемена гађања или померањем давача притиска.

7.4.2. Испитивање са минобацачем 120 mm M95 и мином XM95

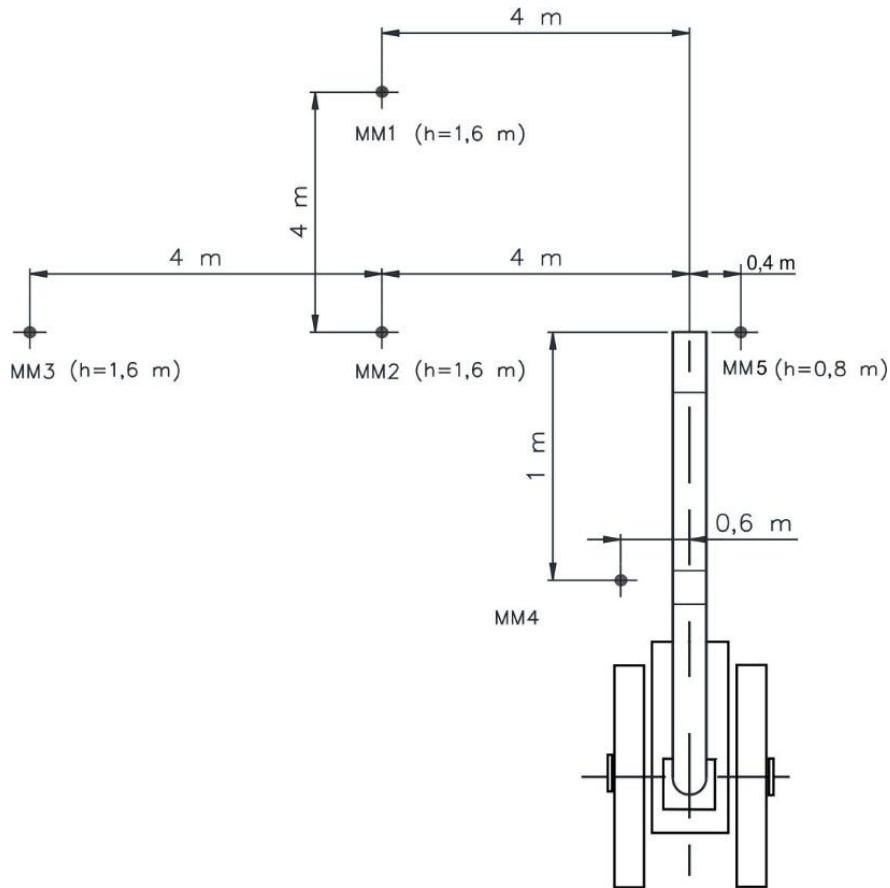
У циљу провере конструкционих и балистичких карактеристика новог минобацачког система великог домета и ефикасности (МБ 120 mm M95/мина 120 mm XM95), извршена су испитивања гађањем на полигону Техничког опитног центра у Никинцима. На извршеним опитима мерене су перформансе које се односе на међубалистику, унутрашњу и спољну балистику испитиваног система, оруђе – пројектил, при чему су мерене следеће величине: почетна брзина, притисак барутних гасова, домет и натпритисак око оруђа.

У току испитивања праћени су параметри оруђа, током опаљења, пре свега, механичка издржљивост елемената оруђа, а резултати испитивања су дати у табели 7.5.

Табела 7.5 - Преглед резултата мерења за случај гађања из оруђа МБ 120 mm М95, са мином 120 mm ХМ95

бр.	V_0	P_m	Δp ММ1	Δp ММ2	Δp ММ3	Δp ММ4	Δp ММ5	Напомена
-	(m/s)	(bar)	(bar)	(bar)	(bar)	(bar)	(bar)	-
1	321,6	836	0,16	0,10	0,05	0,16	0,21	120mmЛТФ НГБ-261/456g (0+6)
2	322,4	856	0,19	0,13	0,06	0,18	0,26	
@Σ X_i/n	322,0	846	0,18	0,12	0,06	0,17	0,24	
1	325,5	836	0,21	0,17	0,08	0,25	0,60	120 mm ХМ95 НГБ-261Б/567g (0+7)
2	326,2	835	0,18	0,17	0,08	0,24	0,65	
$\Sigma X_i/n$	325,8	836	0,20	0,17	0,08	0,24	0,62	
1	397,3	1390	0,24	0,29	0,09	0,29	0,58	120mm ХМ95 НГБ-261Б/810g (0+10)
2	400,3	1410	0,26	0,27	0,10	0,31	0,92	
3	400,9	1396	0,25	0,30	0,09	0,30	0,89	
4	401,3	1406	0,25	0,28	0,11	0,30	0,70	
5	399,2	1380	0,27	0,29	0,09	0,33	1,01	
6	396,5	1409	0,27	0,25	0,10	0,32	0,69	
7	401,0	1373	0,27	0,30	0,09	0,33	0,94	
8	401,3	1420	0,25	0,27	0,10	0,30	0,90	
9	395,9	1407	0,31	0,23	0,10	0,37	0,70	
10	-	1417	0,27	0,27	0,10	0,32	0,82	
11	400,4	1393	0,27	0,27	0,10	0,34	0,97	
12	396,8	1406	0,26	0,27	0,11	0,31	0,76	
$\Sigma X_i/n$	399,2	1401	0,26	0,27	0,10	0,32	0,82	

Распоред мерних места, за мерење натпритиска, око оруђа, у случају гађања из лафетиране крешерне цеви, МБ 120 mm М95, са мином великог домета 120 mm ХМ95, дат је на Сл. 7.10.



Сл.7.10 – Распоред мерних места, за мерење натпритиска, око оруђа, из лафетиране крешерне цеви МБ 120 тт М95, гађањем са мином 120 тт ХМ95.

У оба случаја, приликом мерења натпритиска, на мерним местима ММ1, ММ2 и ММ3, када је гађање вршено са мином 120 тт ЛТФ М62П6 и (О+6) барутним пуњењем, добијене су приближно исте вредности измерених натпритисака и оне у првом случају износе (0,184, 0,122 и 0,047 bar), а у другом (0,18, 0,12 и 0,06 bar), табеле 7.3 и 7.5. Разлика се јавља при гађањима која су вршена са новом мином великог домета 120 тт ХМ95 и новим барутним пуњењем (О+10), при чему су упоредиви подаци, који одговарају условима гађања, са варијантом А, цев без наглавка. У овом случају повећање натпритиска је очекивано и евидентно и оно на мерним местима ММ1, ММ2 и ММ3, код mine 120 тт ЛТФ М62П6, са (О+7) барутним пуњењем, износи (0,197, 0,0817 и 0,056 bar), док код нове mine 120 тт ХМ95, са (О+10) барутним пуњењем, износи (0,26, 0,27 и 0,10 bar).

Уочава се нешто већа вредност измереног натпритиска, на мерном месту ММ2, што је последица другачијих услова гађања, из лафетиране крешерне цеви.

Наиме крешерна цев оруђа, МБ 120 mm М95, је била постављена на лафет хаубице 150 mm М-1910 (Шнајдер), па је у процесу опаљења долазило до њеног померања уназад, услед трзања цеви, што наравно није био случај када се гађање вршило из МБ 120 mm М95, чија је подлога укопана у тло (резултати - табела 7.2). Кориговане вредности натпритиска су добијене на основу повећања растојања (R) мерних места 1 и 2, од уста цеви и промене угла φ , због померања оруђа уназад, за око 0,5 m, према следећем:

Измерене вредности:

- ММ1 ($R_1 = 5,66 \text{ m}$, $\varphi_1 = 45^\circ$) $\Delta p = 0,26 \text{ bar}$
- ММ2 ($R_2 = 4,00 \text{ m}$, $\varphi_2 = 90^\circ$) $\Delta p = 0,27 \text{ bar}$

Кориговане вредности

- ММ1 ($R_1 = 6,02 \text{ m}$, $\varphi_1 = 42^\circ$) $\Delta p = 0,30 \text{ bar}$
- ММ2 ($R_2 = 4,03 \text{ m}$, $\varphi_2 = 83^\circ$) $\Delta p = 0,26 \text{ bar}$

Повећан натпритисак око оруђа је очекиван у случајевима гађања са новом мином великог домета 120 mm ХМ95 и новим барутним пуњењем (О+10), које обезбеђује брзину mine, на устима цеви од 400 m/s и притисак барутних гасова око 1500 bar (брзина је мерена радаром BS-850 "Орос", а притисак крешером са пречником клипа крешер $\varnothing 6,18 \text{ mm}$, бакарни ваљчић $\varnothing 3 \times 4,9 \text{ mm}$). На повећање натпритиска око оруђа, у највећој мери утиче повећање притиска барутних гасова на устима цеви, које је веће за око 50%, у односу на услове гађања са мином 120 mm ЛТФ М62П6 и (О+6) барутним пуњењем.

8. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

Резултати прорачуна натпритиска око оруђа, рачунати су за случај гађања из минобацача 120 mm M95, при гађању са мином M62П6 ЛТФ и барутним пуњењем (O+7). Упоредо са резултатима прорачуна натпритиска, приказани су и експериментални резултати, који су дати у табелама (8.1 и 8.2), а односе се на гађања из минобацача на чијој цеви је постављен цилиндрични уређај, односно дивергентни млазник. Из истог минобацача су вршена гађања и са мином 120 mm XM95 и барутним пуњењем (O+10).

Табела 8.1 – Упоредни резултати натпритиска прорачун – експеримент при гађању из МБ 120 mm M95 (цев са цилиндричним наставком) са ЛТФ мином 120 mm M62П6 - барутно пуњење (O+7)

Минобацач	120 mm M95- цев са цилиндричним наставком		
Мина	120 mm M62П6 ЛТФ – барутно пуњење (O+7)		
Прорачун	Орлов	Модел (2D)	Екперимент
ММ1	$\Delta p = 0,097 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,390 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,166 \text{ bar}$
ММ2	$\Delta p = 0,200 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,317 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,112 \text{ bar}$
ММ3	$\Delta p = 0,030 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,127 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,049 \text{ bar}$
ММ4	$\Delta p = 2,448 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,489 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,189 \text{ bar}$

Анализирајући једначине коришћене за израчунавање вредности натпритиска (2.3 и 2.4), као и појединачни утицај њихових чланова, дефинисани су следећи утицајни параметри, који у највећој мери утичу на ниво натпритиска око оруђа:

- притисак на устима цеви,
- маса барутног пуњења,
- дужина цеви оруђа,
- унутрашњебалистичке карактеристике барута,
- запремина канала цеви, односно калибар оруђа,

- однос специфичних топлота барутних гасова,
- брзина пројектила на устима цеви, и
- брзина звука ваздуха у околној, непоремећеној средини.

Табела 8.2 – Упоредни резултати натпритиска прорачун – експеримент при гађању из МБ 120 mm М95 (цев са дивергентним млазником) са ЛТФ мином 120 mm М62П6 - барутно пуњење (О+7)

Минобацач	120 mm М95 - цев са дивергентним млазником		
Мина	120 mm М62П6 ЛТФ – барутно пуњење (О+7)		
барутно пуњење	Орлов	Модел (2D)	Екперимент
ММ1	$\Delta p = 0,106 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,206 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,183 \text{ bar}$
ММ2	$\Delta p = 0,131 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,162 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,124 \text{ bar}$
ММ3	$\Delta p = 0,020 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,066 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,055 \text{ bar}$
ММ4	$\Delta p = 0,839 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,129 \text{ bar}$	$\Delta p = 0,107 \text{ bar}$

Притисак на устима је доминантан параметар, који у највећој мери утиче на ниво натпритиска око оруђа. Овај притисак је директно зависан од нивоа притиска барутних гасова у комори оруђа, али и од доста других параметара, који утичу на њега. Тако да поред унутрашњебалистичких карактеристика барута, облика $p(t)$ криве, односно физичко-хемијских карактеристика барута и геометријских карактеристика барутног зрна, утиче и дужина цеви оруђа и маса барутног пуњења. Поред наведених параметара, значајан утицај могу имати различита конструкциона решења, штитови који се постављају на оруђе, дефлектори, односно различити уређаји који умањују интензитет натпритиска и смањују "бласт" ефекат. Основни принципи рада ових уређаја заснивају се на експанзији барутних гасова у пригушним међукоморама или дифузорима, који поред смањења нивоа натпритиска врше и усмеравање гасне струје.

8.1. Анализа резултата прорачуна

8.1.1. Аналитичка метода прорачуна (метода Орлова)

Овом методом се на основу разлике у интензитету притиска, који влада у ударном таласу и околној непо ремећеној средини, израчунава вредност натпритиска, на карактеристичним местима око оруђа. Вредности натпритиска барутних гасова (Δp) израчунавају се на основу једначина (2.1 - 2.7), које су дате у поглављу 2.

Ова метода показује прихватљив ниво израчунатих вредности натпритиска на карактеристичним местима ММ1, ММ2 и ММ3, која су постављена на већим растојањима од уста цеви (4 m, 5,66 m и 8 m). Веће одступање израчунатих вредности натпритиска, у односу на измерене вредности, јавља се на малим растојањима, у односу на уста цеви и на местима иза уста цеви, гледано у односу на правац гађања. Ово одступање је потврђено, прорачуном натпритиска на тачки ММ4, која се налази непосредно уз цев оруђа. Разлог овог одступања је доминантан утицај растојања у једначини натпритиска (2.4) где је растојање (R) укључено као члан имениоца ове једначине са експонентом трећег степена. Поред тога закључак је да ова метода даје коректне резултате за тачке прорачуна које се налазе у фронталном делу, испред оруђа, односно од линије уста цеви, унапред. Пример за то су резултати натпритиска за тачке ММ1, 2 и 3. Такође утицај угла φ у поменутој једначини није одговарајући за тачке у простору иза ватрене линије (пример тачка ММ4). Израчунате вредности натпритиска на месту послужиоца (нишанције) су вишеструко веће од измерених (за цилиндрични наставак око 13 пута), па се на основу ове методе не може поуздано одредити ниво натпритиска, у зони непосредно око оруђа и иза ватрене линије, односно на местима која заузимају послужиоци током гађања.

Други недостатак ове методе прорачуна односи се на чињеницу да се на овај начин може израчунати највећа вредност натпритиска у одређеној тачки простора, без могућности израчунавања промене натпритиска у функцији времена, односно није могуће дефинисати просторну и временску расподелу поља натпритиска. Из тог

разлога је немогуће, коришћењем ове методе, добити представу о интензитету поља натпритиска и његовој промени са временом. Такође није могуће израчунавање других величина, које карактеришу гасну струју током опаљења, односно није могуће израчунати вредности: Маховог броја, густине, притиска и концентрације барутних гасова у простору, односно њихову промену током времена.

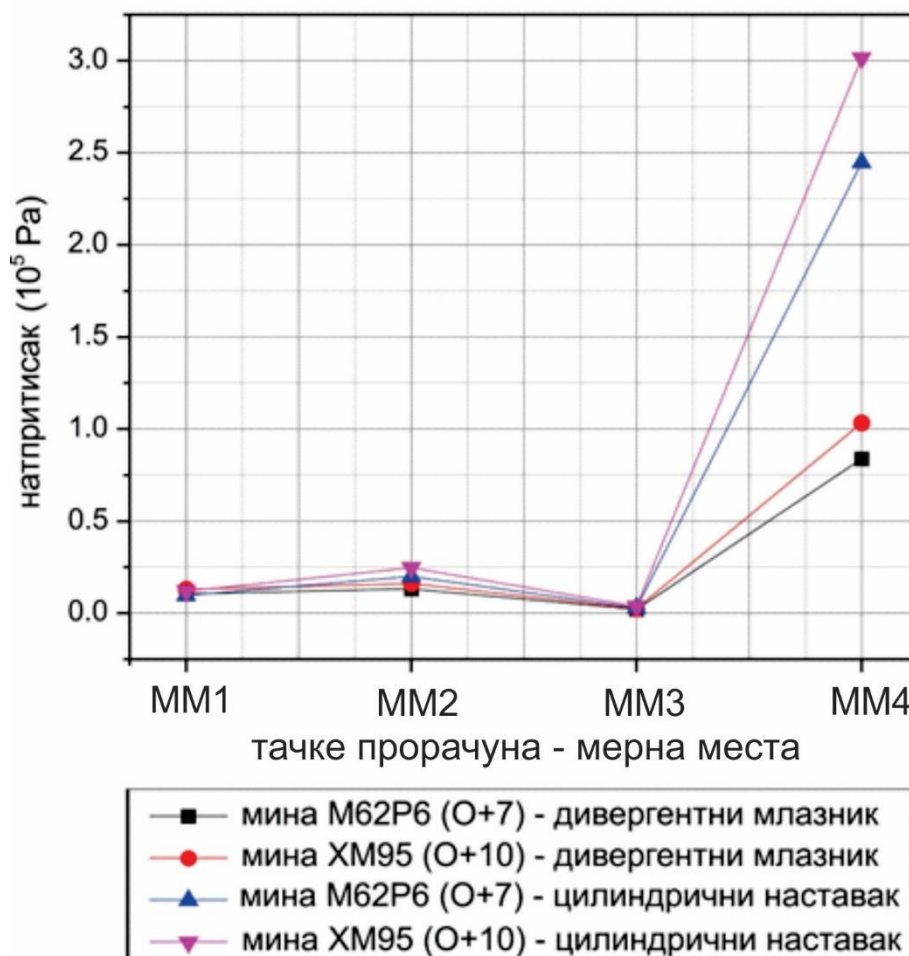
За повећање натпритиска, по овој методи, најудицајнији параметар је притисак барутних гасова у комори оруђа (p_m), односно притисак на устима цеви (p_u). Упоредивањем вредности притиска, који су добијени гађањем са ове две мине, повећање притиска на устима цеви (p_u) је 23% и оно у највећој мери утиче на пораст израчунате вредности натпритиска око оруђа.

Врста барута, његове геометријске, физичко-хемијске и балистичке карактеристике у корелацији са конструкционим карактеристикама система оруђе-пројектил, утичу на вредност притиска на устима цеви, односно на ниво натпритиска око оруђа.

Прорачунски резултати натпритиска, за случај опаљења из минобацача 120 mm М95, добијени овом методом, показују очекивани пораст вредности натпритиска, у случају опаљења са мином 120 mm ХМ95 и барутним пуњењем (О+10), у односу на опаљење са мином 120 mm М62П6 и барутним пуњењем (О+7), што је у сагласности са експерименталним резултатима.

На дијаграму 8.1 приказани су резултати прорачуна интензитета натприска, за мерна места од ММ1 до ММ4. Вредности натприска на мерном месту ММ4 су вишеструко веће од очекиваних, односно измерених. Пошто метода прорачуна по Орлову узима у обзир могућност гађања из оруђа са и без гасне кочнице, да би се добило решење које узима у обзир ефекат дивергентног млазника, у прорачун је уведен коефицијент млазника, који је емпиријског карактера. На овај начин је добијена разлика у израчунатој вредности натприска, за случај гађања са цилиндричним, односно дивергентним уређајем, који је постављен на устима цеви. Ниже вредности натпритиска које су добијене са дивергентним млазником, су очекиване, мада ни оне не прате експериментално добијену вредност за тачку,

која одговара мерном месту ММ4, односно прорачунска вредност и даље је значајно већа.



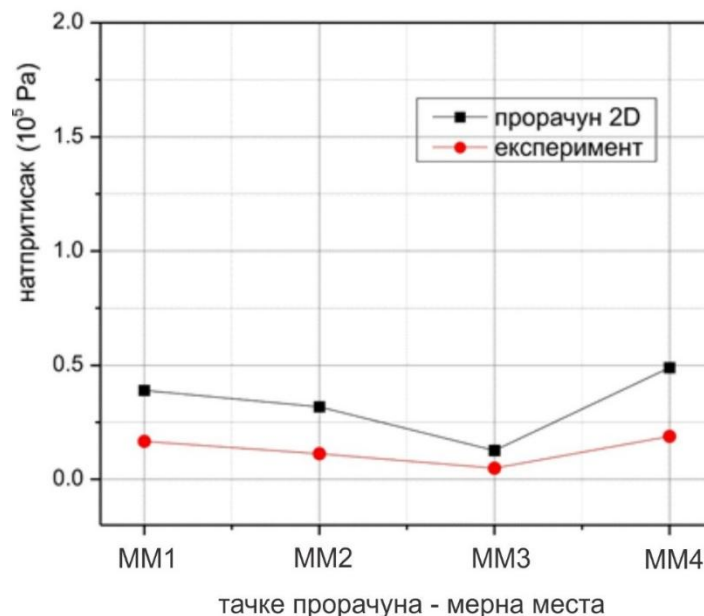
Дијаграм 8.1 - Прорачунски резултати натпритиска добијени методом Орлова, за случај опаљења из МБ 120 тт М95, са минама 120 тт ЛТФ М62П6 и ХМ95

8.1.2. Гасодинамичка метода прорачуна (2D)

Ова метода прорачуна је заснована на описаном физичко-математичком моделу и дводимензионалној (2D) нумеричкој симулацији. Добијене су вредности карактеристичних величина гасне струје, укључујући и њихову промену са временом. Израчунате вредност натпритиска, за мерна места ММ1 – ММ4, дате су упоредно са експерименталним резултатима (Дијаграми - 8.2 и 8.3).

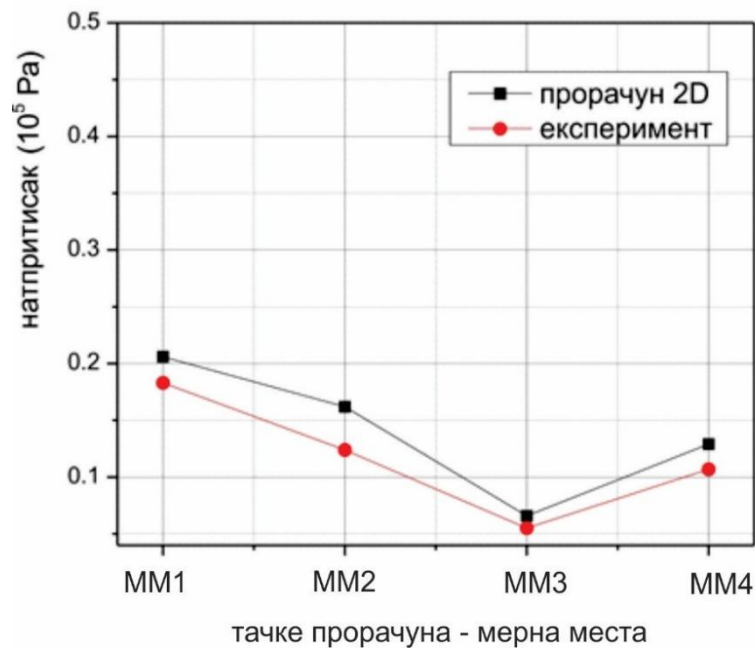
Уочено је да се на свим мерним местима измерене и прорачунске вредности натпритиска углавном поклапају и да се могу сматрати прихватљивим.

Генерално, резултати добијени са гасодинамичким прорачуном (2D), су задовољавајући, што потврђују и упоредни резултати, прорачун (2D) – експеримент, приказани на Дијаграмима - 8.2 и 8.3



Дијаграм 8.2- Прорачунски и експериментални резултати натпритиска, за случај опаљења из МБ 120 тт М95, са мином ЛТФ М62П6 и (0+7) барутним пуњењем (цилиндрични наставка)

Треба напоменути да је већа разлика између прорачунских и експерименталних резултата добијена у случају гађања са цилиндричним наставком него са дивергентним, што је разумљиво јер су притисци у излазном пресеку цилиндричног наставка већи него код дивергентног наставка (мерно мест М2), овим је потврђена чињеница да 2D нумеричка симулација даје веће прорачунске притиске у односу на 3D нумеричку симулацију, што је такође дато у литератури [48]. Поменута појава је у већој мери изражена код цилиндричног наставка због већих вредности притисака у излазном пресеку и што у примењеном 2D прорачуну утиче на израчунате вредности натпритиска.



Дијаграм 8.3 – Прорачунски и експериментални резултати натпритиска, за случај опаљења из МБ 120 тт М95, са мином ЛТФ М62П6 и (0+7) барутним пуњењем (дивергентни наставак)

На основу резултата гасодинамичког прорачуна (2D), чији су резултати дати на дијаграмима 6.3 и 6.5, а који се односе се на цилиндрични уређај и дивергентни млазник, утврђене су брзине простирања поремећаја, односно брзине кретања ударног таласа.

Код је опаљења из цеви са цилиндричником наставком време наиласка ударног таласа до MM1 је 11 ms, пошто се тачка MM1 налази на растојању од 5,66 m, у односу на уста цеви и постављена је под углом од 45° улево, брзина наиласка УТ је 515 m/s, Код цеви са дивергентним млазником време време наиласка УТ до тачке MM1 износи 13 ms, па брзина УТ износи 435 m/s.

Највећа вредност брзине брзине кретања гасне струје јавља се у фронталном делу испред уста цев и она код опаљења из цеви са цилиндричним наставком износи 3,48 М, док код опаљења из цеви са дивергентним млазником износи 2,78 М.

Наведени резултати су потврђени приликом експерименталних испитивања на полигону, када су мерења извршена тако што је временска оса приликом мерења натпритиска усклађена са тренутком иницијације, односно појаве сигнала фотоћелије. Иницијација фотоћелије је тренутак појаве интензивног бљеска, који

се може сматрати почетком појаве наглог истицања барутних гасова из цеви. На овим дијаграмима је дата максимална вредност натпритиска и време $T_{\text{поц}}$ од тренутка појаве сигнала фотоћелије до регистровања појаве натпритиска на сонди за мерење натпритиска. Ови резултати се односе на опите који су извршени са мином 120 mm ЛТФ М62П6 и дати су у Прилогу 2.5.

8.2. Анализа експерименталних резултата

На бази анализе презентованих резултата испитивања, који су приказани на дијаграмима 8.4, 8.5 и 8.6, закључује се следеће:

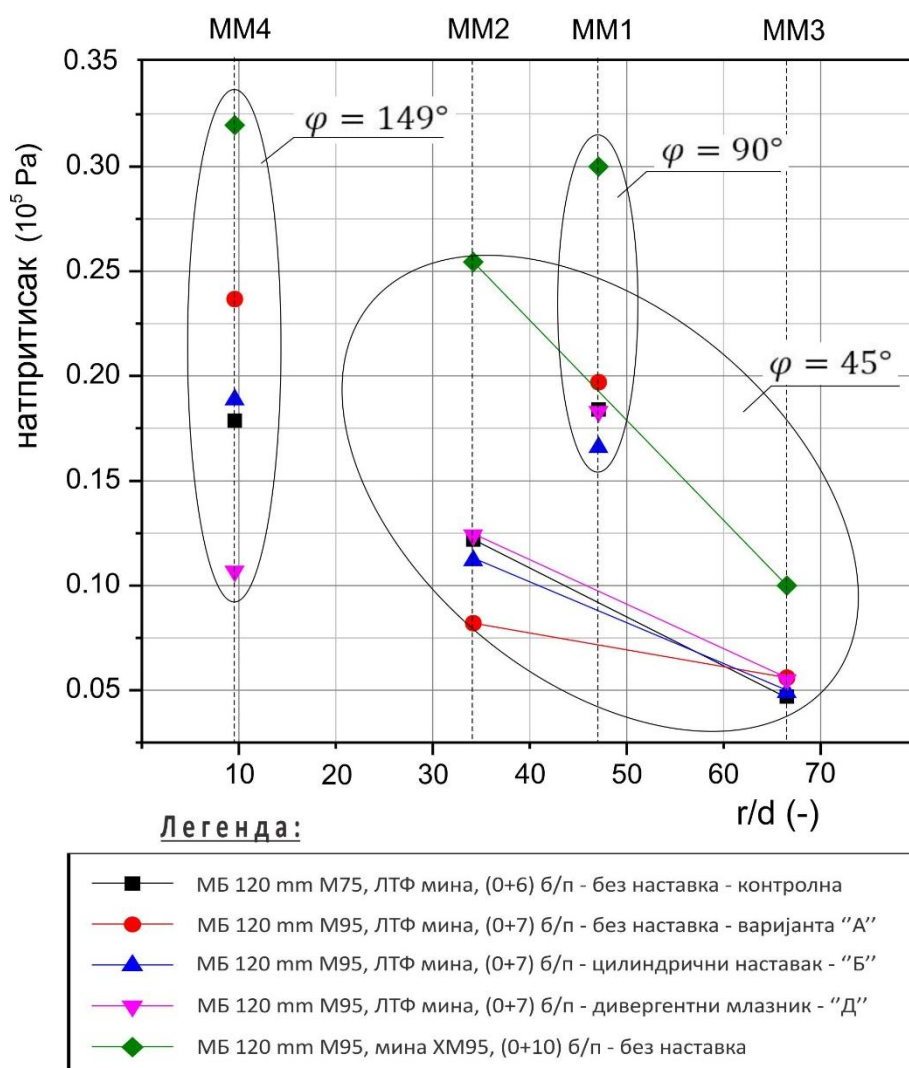
- највеће смањење натпритиска на ММ4 (место пуниоца) измерено је код варијанте решења "Д", са дивергентним наставком - млазником (Сл. 5.3), приликом чега је натпритисак на поменутом месту мањи за 2,2 пута, у односу на основну варијанту, решења "А" (цев без наглавка). Резултат је очекиван с обзиром да у овом случају долази до додатне експанзије барутних гасова у дивергентном млазнику, чиме се смањује интензитет притиска у излазном пресеку млазника, а што за последицу има ниже вредности натпритиска на коришћеним мерним местима. Поред овога утицај има и боље усмеравање гасне струје у простор испред цеви минобацача, што се посебно односи на резултате мерења на мерном месту ММ4;
- код обе варијанте решења цеви које су имале наставак у облику млазника или комбинацију цилиндар-млазник "Д" и "Ц" (Сл. 5.3 и 5.2) измерени су нижи нивои натпритисака на ММ4 у односу на III групу (контролну) која је испитана са барутним пуњењем (0+6) из минобацача 120 mm М75. Измерени натпритисци су мањи за 1,7 пута, код варијанте "Д", односно 1,5 пута, код варијанте "Ц";
- код варијанте решења "Б" (цилиндрични наставак) на ММ4 у односу на основну варијанту "А" измерен је ниво натпритиска мањи за 20%, а у односу на "контролну групу" већи за 5%;
- код свих испитаних група није уочено повећање растурања погодака на циљу;

- наведена конструкциона решења нису дала значајније повећање почетне брзине мине и оно се креће у интервалу од 1 до 2%;
- понашање оруђа у току гађања било је правилно, односно оруђе је било стабилно при свим опаљењима;
- на деловима и склоповима оруђа, визуелним прегледом, нису уочене деформације и прскотине;
- одступања на поделама нишанске справе НСБ-5 била су у допуштеним границама ($< 0-02$), односно НС је задовољила у погледу отпорности и функције у извршеном обиму испитивања;
- укупно утапање подлоге, за испалјену групу мина, највеће је за варијанту решења “Д” (300 mm), а најмање, за варијанту решења “Ц” (220 mm);
- укупно померање подлоге оруђа уназад за испалјену групу мина највеће је за варијанту решења “Б” (240 mm), а најмање за варијанту решења “Ц” (130 mm);
- ако се претпостави да је хомогеност тла од једног до другог ватреног положаја уједначена, уочава се да је утапање подлоге највеће код варијанте решења “Д”, што је разумљиво јер је реактивна сила млазника највећа код ове варијанте решења, односно специфични притисак на тло се повећава у односу на варијанте решења “Б” и “Ц”.

Иако је варијанта решења “Д”, без сумње дала најбоља резултате, из угла смањења натпритиска на месту послужилаца, она има за последицу повећано утапање подлоге, што проузрокује отежано руковање оруђем, односно, повећано време реакције оруђа због већег времена неопходног за вађење подлоге.

Анализирањем наведених примедби треба имати у виду чињеницу да су сва испитивања гађањем, вршена са подлогом минобацача 120 mm М75, која је пројектована за минобацач, који има значајно мањи радни притисак, а да при томе нису уочене било какве деформације или оштећења на провераваним склоповима.

Ова подлога је коришћена из разлога што новопроектвана подлога прототипа минобацача 120 mm M95 у фази испитивања није била расположива.

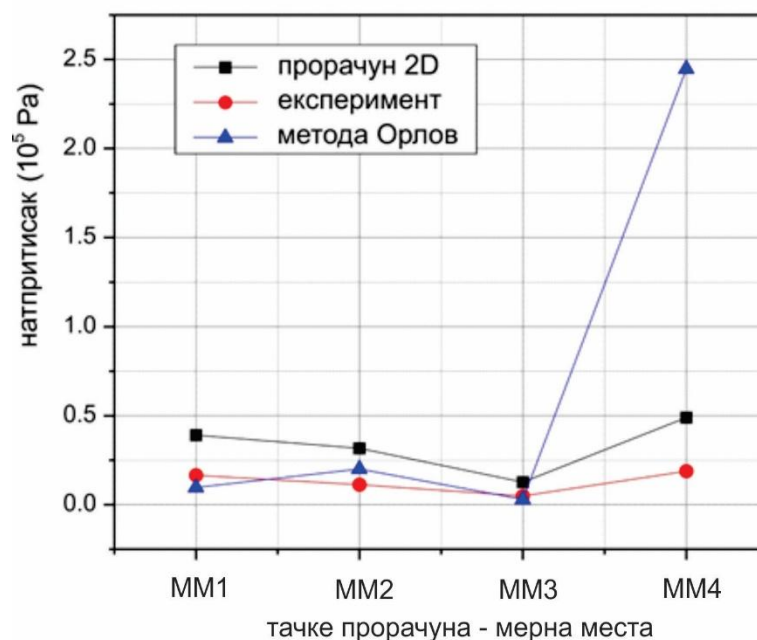


Дијаграм 8.4 – Експериментални резултати натпритиска барутних гасова око оруђа на мерним местима 1, 2, 3 и 4

Поред тога, приликом разматрања треба имати у виду да су савремени самоходни минобацачки системи опремљени ефикасним противвртзајућим уређајима (ПТУ), који дозвољавају уградњу ових минобацача на различите точкашке и гусеничне платформе уз значајно редуковање реактивне силе.

Веома је важна чињеница да се рад посаде на отвореној платформи, самоходних минобацача, реализује у непосредној близини отвора уста цеви и да је неопходно умањити неповољне ефекте дејства барутних гасова на чланове посаде. Ово је

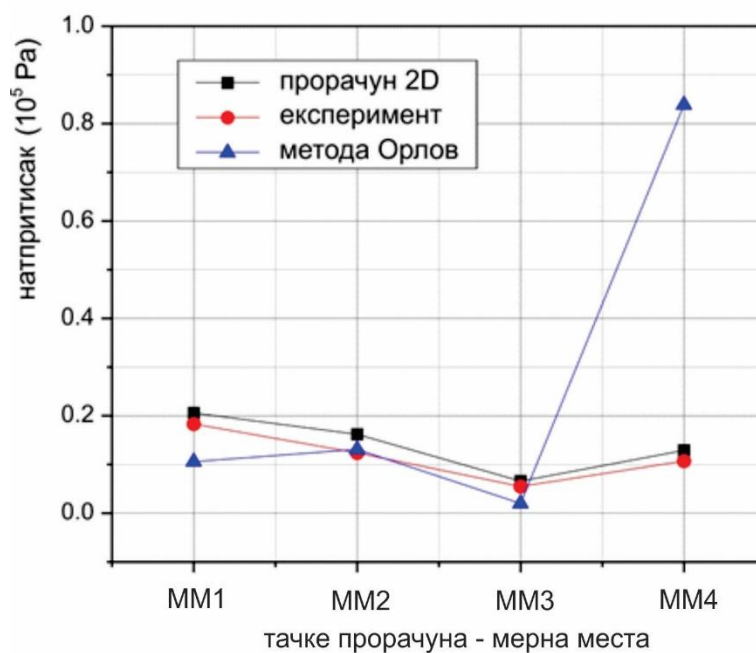
посебно важно приликом гађања рафалном, односно брзом палбom, јер се вишеструко увећава број опаљења у јединици времена.



Дијаграм 8.5 – Упоредни резултати прорачуна нумеричког (2D) и класичног (Орлов) са експериментом, МБ 120 мм М95, мина М62П6 (0+7) - цилиндрични наставак

Експериментални резултати добијени мерењем натпритиска барутних гасова у току гађања из минобацача 120 мм М95 (Прилози 2.1 – 2.4) указују на уједначеност облика $p(t)$ криве у току процеса опаљења. На свим графицима се уочава нагли пораст притиска, затим опадање његове вредности и прелазак у фазу потпритиска, након чега наступа постепено изједначавање притиска до нивоа притиска околног ваздуха. Овакав ток $p(t)$ криве се региструје на мерним местима 1, 2 и 3, док се на мерном месту 4, бележи другачија појава која указује на то да ово мерно место није на путу главне гасне струје и њега карактерише више маљих пикова који обележавају зону натпритиска и веће вредности потпритиска у односу на мерна места 1, 2 и 3. Ово указује да се на овом мерном месту након почетног натпритиска јавља зона већег потпритиска са интензивним турбулентним струјањем. На мерним местима 1, 2 и 3 се уочавају мањи пикови преткурсора и рефлектујућих таласа, који су по правилу увек мањег интензитета од доминантног пика, који

одређује вредност максималног натпритиска и односи се на наилазак главног УТ, односно главне струје барутних гасова.



Дијаграм 8.6 – Упоредни резултати прорачуна нумеричког (2D) и класичног (Орлов) са експериментом, МБ 120 тт М95, мина М62П6 (0+7) - дивергентни наставак

На графицима Прилога 2.5, где је синхронизована временска база мерења, односно почетни тренутак $t(0)$ је на свим графицима исти и представља тренутак појаве притиска на устима цеви. На овим графицима се може пратити време наилазак УТ и оно одговара временима добијеним у 2D нумеричкој симулацији, са напоменом да су прорачунска времена нешто краћа јер је прорачун рађен за случај опаљења са већим барутним пуњењем (0+7), где су већи притисци и појава истицања барутних гасова је бржа. Код измерених резултата, датих на овим графицима гађање је извршено са барутним пуњењем (0+6).

8.3. Закључци анализе резултата

На основу извршене анализе, која се базира на резултатима прорачуна, експерименталним испитивањима, са минобацачким системом 120mm и примењеним конструкционим решењима, закључује се следеће:

- са аналитичком методом прорачуна нису добијене прихватљиве вредности натпритиска у тачкама поља у непосредној близини цеви и иза линије гађања, у тачкама које се налазе на већим даљинама у линији гађања и испред ње добијени су задовољавајући резултати,
- са гасодинамичким прорачуном, на бази предложеног физичко-математичког модела и нумеричке 2D симулације, добијене су задовољавајуће вредности натпритиска, имајући у виду чињеницу да овај модел даје веће вредности натпритиска у односу на 3D нумеричку симулацију, што је такође наведено у литератури [56],
- гасодинамички прорачуни, са 2D нумеричком симулацијом, су показали да предложени физичко-математички модел, са примењеним софтвером уз коришћење адаптивно генерисаних мрежа, довољно тачно и прецизно одређује положај и јачину ударног таласа,
- гасодинамички прорачун, са 3D нумеричком симулацијом, није дао задовољавајуће резултате јер примењени софтвер и поред коришћења адаптивних мрежа не може довољно тачно да одреди положај и јачину ударног таласа, што је такође наведено у литератури [49],
- предложеним физичко-математичким моделом и примењеном нумеричком симулацијом израчунавају се карактеристичне величине гасне струје, (брзина, густина, притисак и концентрација барутних гасова), које се могу посматрати у различитим временским интервалима и различитим тачкама простора, око оруђа,
- предложено конструкционо решење умањује неповољан утицај натпритиска барутних гасова на посаду и омогућава да посада, без штетних

последица по здравље, може да изврши већи број опаљења, односно да дуже времена врши ватрена дејства,

- најповољније решење са становишта смањења натпритиска ударног таласа барутних гасова је **уређај са дивергентним млазником (варијанта "Д")**, при чему је његова лоша страна повећање реактивне силе на подлогу, односно повећано оптерећење подлоге,
- додавањем посебног механичког или електромеханичког уређаја на предложено решење наставка на устима цеви, може се обезбедити додатна функција, којом се повећава безбедност посаде приликом гађања, јер се онемогућава пуњење минобацача следећом мином, уколико дође до застоја, односно неопалења,
- применом предложеног модела и коришћене нумеричке симулације, још у фази пројектовања, се могу добити поуздане вредности нивоа натпритиска у зони око оруђа, чиме се са аспекта дозвољеног натпритиска може проверити прихватљивост пројектованог решења.

9. ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕДЛОЗИ

9.1. Рекапитулација докторске дисертације

У реализацији докторске дисертације урађено је следеће:

1. Представљена су теоријска и практична знања, потребна за дефинисање гасодинамичких појава, током опаљења оруђа и примењена су на ново решење прототипа минобацача великог домета и ефикасности.
2. Предложена су одговарајућа конструкциона решења, која доводе до смањења утицаја неповољних пратећих "Blast" појава које се јављају током процеса опаљења (ударни таласи и натпритисак).
3. Описан је физичко-математички модел са поступком моделирања, нумеричком симулацијом струјања и предложеним моделом промене притиска и температуре барутних гасова на устима цеви.
4. Дат је приказ резултата гасодинамичких прорачуна, класичном методом "Орлова" и нумеричком симулацијом, на бази предложеног физичко-математичког модела, кроз дводимензионалну (2D) и тродимензионалну (3D) нумеричку симулацију.
5. Описана је методологија експерименталних испитивања и мерења. Објашњена је мерна метода и дата је поставка мерења кроз приказ експерименталних испитивања на испитиваном минобацачком систему 120 mm M95.
6. Извршена је упоредна анализа прорачунских и експерименталних резултата, на бази чега је дата оцена предложеног физичко-математичког модела и примењене нумеричке симулације.

7. Посебно је анализирана ефикасностразматраних конструкционих решења уређаја, постављених на устима цеви, са циљем умањења неповољних појава, које се јављају током процеса опаљења.
8. На бази расположивих резултата и датих анализа извршен је одабир најповољнијег решења.
9. Реализована је целовита теоријско-прорачунска метода, на бази које се могу прорачунавати и пратити параметри гасне струје у околини оруђа.

9.2. Закључци

У раду је потврђена општа хипотеза:

- Дефинисана је интегрална теоријско-пројектна метода, која омогућава да се у фази пројектовања одреде сви потребни гасодинамички параметри, који одређују стање гасне струје, која се јавља на устима цеви оруђа, а настаје у процесу опаљења. Пошто CFD даје добре резултате, у току процеса пројектовања или евентуалних конструкционих измена на минобацачу није потребно увек вршити скупе експерименте, већ се можемо ослонити на резултате нумеричких симулација.

На овај начин, примењеном теоријско-пројектном методом, унапређује се процес пројектовања оруђа и оружја, у целини, кроз поуздано одређивање гасодинамичких параметара, који се јављају у процесу опаљења.

Потврђене су и појединачне хипотезе које су се користиле у дисертацији:

- Предложено теоријско решење је експериментално потврђено на конкретном примеру развоја прототипа минобацачког система 120 mm M95, повећаног домета.

- Предложено техничко решење за смањење интензитета натпритиска, на месту посаде, минобацача 120 mm, дало је задовољавајуће резултате и експериментално је потврђено.
- Примењена метода мерења, у експерименталној фази реализације, обезбедила је поуздане и квалитетне резултате мерења, чиме је верификована теоријска поставка са примењеним физичко-математичким и нумерчким моделом.

Теоријски и практични допринос докторске дисертације

- Кроз наведено истраживање унапређен је постојећи физичко-математички модел, који је у домену међубалистике, успешно описао појаве истицања барутних гасова у току процеса опаљења из минобацача.
- На бази предложеног физичко-математичког модела реализована је дводимензионална нумеричка симулација којом се одређују карактеристичне величине струјног поља: притисак, густина, Маховог број и концентрација барутних гасова у току времена, у пољу око минобацача.
- Предложеним конструкционим решењем уређаја, који се поставља на уста цеви, остварује се прихватљив ниво смањења натпритиска, на месту послужиоца, чиме се омогућује примена новог унутрашњебалистичког решења и остварење пројектованог максималног домета.
- Експериментални резултати, са примењеном методом мерења, потврдили су прихватљив ниво тачности прорачунских вредности натпритиска на карактеристичним мерним местима, око оруђа.

9.3. Предлози за даљи рад

- Потребно је наставити са унапређењем модела за израчунавање параметара гасне струје у процесу опаљења, који ће укључити реалне тродимензионалне моделе борбених платформи са припадајућим подсисатемима, што је посебно значајно за сложене борбене системе (самоходна оруђа, тенкове, оклопна возила, бродове и сл.).
- Потребно је започети активности на реализацији посебног модула, који би се имплементирао у постојећи софтвер, у циљу боље идентификације параметара ударних таласа, чиме ће се створити предуслови за примену тродимензионалне (3D) нумеричке симулације у решавању оваквих проблема.
- Потребно је наставити са унапређењем уређаја, који се поставља на уста цеви, интеграцијом заштитног механизма, који спречава пуњење другом мином у случају застоја и неопалења. Такође је могуће извршити интеграцију уређаја за мерење почетне брзине минобацачке мине и његово повезивање у систем за управљање ватром (СУВ).

10. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Edward M. Schmidt, Gun Propulsion Technology, Chapter 7, Muzzle Flow Gasdynamics, ISBN 0-930403-20-7, Washington, 1995.
- [2] Cranz, C., INNERE BALLISTIK, Die Bewegung Des Geschosses Durcs Das Rohr Und Ihre Begleit Ercheinungen, Julius Springer, Berlin, 1926.
- [3] G. Settles, Schlieren and Shadowgraph Techniques, Visualizing Phenomena in Transparent Media, Springer, New York, 2001.
- [4] Buckmaster, J. D. An Investigation of Cylindrical Starting Flows AIAA Journal, Vol. 2, No. 9, pp. 1649-1650, 1964
- [5] Starshinov, A. I. Experimental Investigation of the Initial Stage of the Formation of a Gas Jet, Mekhaniki Astronomii, 1964
- [6] Naboko, I.M., Bazhenova, T.V., Opara, A.I., Belavin, V.A, Formation of a Jet of Shock-Heated Gas Outflowing into Evacuated Space, Astronautica Acta, Vol. 17, pp.653-658, 1972
- [7] Oswatitsch, K. Intermediate Ballistics, Deutschen Versuchsansialt fiir Luft-und Raumfahrt, FRG, Rept. 358, Aachen, 1964.
- [8] Taylor, T.D. Calculation of Muzzle Blast Flow Field CR, 4155, 1970, Picatinny Arsenal, Dover, N.J.
- [9] Tract, R.M., Farr, J.L.,Liu, C.Y., A Numerical Method for the Simulation of Muzzle Gas Flows with Fixed and Moving Boundaries, BRL CR 161, 1974., Research Labs., Aberdeen Proving Ground.
- [10] Schmidt, E.M., Shear, D.D., Optical Measurements of Muzzle Blast, AIAA Journal, Vol. 13, pp. 1086-1091, 1975.
- [11] Карактеристичне појаве у области међубалистике, Научнотехничка информација, Војнотехнички институт, Београд 1980
- [12] E. M. Schmidt, R. E. Gordnier, K. S. Fanslert, Interaction of Gun Exhaust Flowfields, AIAA Journal, Vol. 22, No. 4, pp. 516-517, 1984.

- [13] Орлов Б.В., Ларман Э.К., Маликов В.Г., Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий, Машиностроение, 1976
- [14] М.Будиселић, УНУТРАШАЊА БАЛИСТИКА, Технички школски центар КоВ, Загреб 1971.
- [15] Калезић В. Миомир.ПРОЈЕКТОВАЊЕ АРТИЉЕРИЈСКИХ СИСТЕМА, Књига I, Београд 2010.
- [16] С.А.Горовой, ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТРЕЛКОВО-ПУШЕЧНОГО, АРТИЛЛЕРИЙСКОГО И РАКЕТНОГО ОРУЖИЯ – БАЛЛИСТИКА, Сибирская государственная геодезическая академия, Новосибирск, 2007.
- [17] G. Klingenberg, Gun Propulsion Technology – Experimental Diagnostics in Reacting Muzzle Flows, Chapter 8, ISBN 0-930403-20-7, pp.183-260, M. Summerfield, Washington, 1995.
- [18] С. Јарамаз, Д. Мицковић, УНУТРАШЊА БАЛИСТИКА, Универзитет у Београду, Машински факултет, (стр. 193 – 204), Београд 2013. г.
- [19] Carlucci, Donald E., I. Jacobson, Ballistics - theory and design of guns and ammunition, ISBN-13: 978-1-4200-6618-0, Taylor & Francis Group, CRC Press Online, 2008
- [20] М.Лисов, ОЦЕНА МОГУЋНОСТИ ПРИМЕНЕ НОВИХ МАТЕРИЈАЛА ЗА ИЗРАДУ ВОДЕЋЕГ ПРСТЕНА АРТИЉЕРИЈСКИХ ПРОЈЕКТИЛА, Магистарски рад, Центар за мултидисциплинарне студије, Универзитет у Београду, 2006.
- [21] M. Lisov, S. Jaramaz, M. Kozić, N. Ristović, Shock wave Overpressure of Propellant Gases Around the Mortar, Proceedings of 7th International Scientific Conference on Defensive Technologies, ОТЕН – 2016, Belgrade, pp. 320-324, 2016.
- [22] D.L.Cler, M.Doxbeck, Development of a 3-D Blast Overpressure Modeling Capability Utilizing Fluent, International ANSYS Conference, Pittsburgh 2008.
- [23] Frederic G. Hirsch, M.D., EFFECTS OF OVERPRESSURE ON THE EAR- A REVIEW, Technical Report No. DA-49-146-XZ-372, Lovelace Foundation for Medical Education and Research Albuquerque, New Mexico, DASA 1858, November 1966

- [24] Anderson D.J., Jr., Computational Fluid Dynamics - The Basics With Applications, Chapter 2, The Governing Equations of Fluid Dynamics, McGraw-Hill Book Company, New York 1995.
- [25] Richardson L.F., THE APPROXIMATE ARITHMETICAL SOLUTION BY FINITE DIFFERENCES OF PHYSICAL PROBLEMS INVOLVING DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH AN APPLICATION TO THE STRESSES IN MASONRY DAM, Trans. Roy. Soc. Lond. Ser. A, 1910. 210, pp. 307-357.
- [26] Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H., UBER DIE PARTIELLEN DIFFERENZGLEICHUNGEN DER MATHEMATISCHEN PHYSIK, Mathematische Annalen, 1928., Vol. 100, pp. 32-74.
- [27] Godunov S.K., A DIFFERENCE SCHEME FOR NUMERICAL COMPUTATION OF DISCONTINUOUS SOLUTIONS OF HYDRODYNAMIC EQUATIONS, Math. Sbornik, 1959, Vol. 47, pp. 271-306.
- [28] Beam R.M., Warming R.F., AN IMPLICIT FACTORED SCHEME FOR THE COMPRESSIBLE NAVIER-STOKES EQUATIONS, AIAA J. 16, 1978, pp. 393-401.
- [29] Jameson A., TRANSONIC AEROFOIL CALCULATIONS USING THE EULER EQUATIONS In. Numerical Methods in Aeronautical Fluid Dynamics, New York 1982, P.L.Roe Academic Press, pp. 289-308.
- [30] Zienkiewicz O.C., Cheung Y.K., FINITE ELEMENTS IN THE SOLUTION OF FIELD PROBLEMS, The Engineer, 1965, pp. 507-510.
- [31] Oden J.T., FINITE ELEMENTS OF NON LINEAR CONTINUA, Mc Graw-Hill, 1972, New-York.
- [32] Chung T.J., FINITE ELEMENT ANALYSIS IN FLUID DYNAMICS, Mc Graw-Hill International book, New York 1978.
- [33] Rizzi A.W., Inouye M., TIME SPLIT FINITE VOLUME METHOD FOR THREE DIMENSIONAL BLUNT-BODY FLOWS, AIAA J. 1973, 11.11, pp. 1478-1485.
- [34] Cvetko Crnojević, Mehanika Fluida, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2014.
- [35] ANSYS Fluent 12.0, User's Guide, January 30, Fluent Inc., 2009.

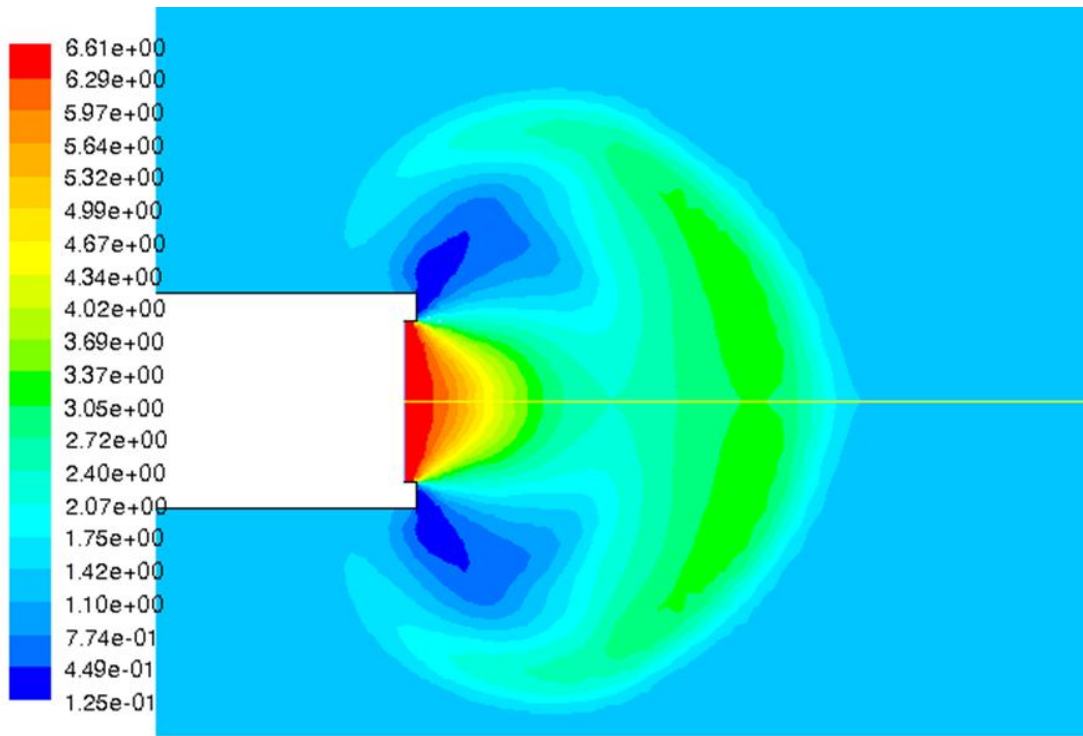
- [36] M.Козић, Примена нумеричке динамике флуида у аеронаутици, Кумулативна научнотехничка информација, Монографска серија ISSN 1820-3418, Војнотехнички институт – Београд, 2013
- [37] R.Lohner, Applied CFD Techniques An Introduction Based on Finite Elements Methods, 14. Adaptive Mesh Refinement, WILEY, England, 2008.
- [38] Siclari M.J., Jameson A., A MULTIGRID FINITE VOLUME METHOD FOR SOLVING THE EULER AND NAVIER-STOKES EQUATIONS FOR HIGH SPEED FLOWS, AIAA Paper, 1989, AIAA-89-0283.
- [39] J. F. Dannenhoffer, A comparison of adaptive-grid redistribution and embedding for steady transonic flows, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Special Issue: Adaptive Meshing Volume 32, Issue 4, pages 653–663, September 1991.
- [40] Boris Nikolaevich Delaunay, Mesh book - Delaunay Mesh Generation, Two-dimensional Delaunay triangulations, Department of Electrical Engineering and Computer Science University of California at Berkeley, CA 94720, Berkeley 1999
- [41] D. HOLMES, S. CONNELL. Solution of the 2D Navier-Stokes equations on unstructured adaptive grids, 9th Computational Fluid Dynamics Conference, Buffalo, NY, U.S.A., 1989.
- [42] Chung T.J., COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS, ISBN 0 521 59416 2, Cambridge University Press, 2002.
- [43] G.Rudinger, Fundamentals Of Gas-Particle Flow, Department of Mechanical Engineering, State University of New York at Buffalo, NY, USA, 1980
- [44] E.Freedman, Gun Propulsion Technology, Thermodynamic Properties of Military Gun Propellants, M. Summerfield, ISBN 0-930403-20-7, Washington, 1995.
- [45] <http://www.army-guide.com/eng/product3210>
- [46] R.Rončević, M.Lisov, M.Jezdimirović, Future Mortars Systems, 6th International Scientific Conference on Defensive Tehnologies, Belgrade 2014
- [47] <http://www.military.com/equipment/m252-mortar>

- [48] Серебрјаков, М.Е, Внутреннаја балистика ствольних систем и порохових ракет, Государственное Научно-Техническое Издательство - Оборонгиз, Москва, 1962
- [49] K.A. Kurbatskii, F.Montanari, D.L.Cler, M.Doxbeck, Numerical Blast Wave Identification and Tracking Using Solution-Based Mesh Adaptation Approach, 2007., AIAA Paper 2007-4188.
- [50] D.L.Cler, M.Doxbeck, Development of a 3-D Blast Overpressure Modeling Capability Utilizing Fluent, International ANSYS Conference, Pittsburgh 2008.
- [51] СНО 8036 - Оруђа и оружја, Мерење натпритиска ваздушног ударног таласа око оруђа – оружја (Сл. војни лист бр.28/90)
- [52] MIL-STD-1474D, DEPARTMENT OF DEFENSE DESIGN CRITERIA STANDARD, NOISE LIMITS, Department of Defence, Washington, 1997.
- [53] М.Лисов, Н.Митровић, Р.Рончевић, ИЗВЕШТАЈ О ИСПИТИВАЊУ УТИЦАЈА МЛАЗНИКА НА УСТИМА ЦЕВИ НА НИВО НАТПРИТСКА ОКО МИНОБАЦАЧА, ВТИ 02-01-0625, Војнотехнички институт, Београд 2000.
- [54] M.LISOV, S.JARAMAZ, M.KOZIĆ, I.IVANOVIĆ, Possibility of Reducing the Overpressure of Shock Wave of Powder Gases around the Mortar, Technical Gazette, Vol. 25, No. 2, page 603-608, 2018
- [55] M. Lisov, S. Jaramaz, M. Kozić, N. Ristović, Shockwave Overpressure of Propellant Gases Around the Mortar, Scientific Technical Review, Belgrade, 2016, Vol.66, No.4, pp. 29-33
- [56] N.W.PAGE, P.I.McKELVIE, "Shock Waves Generated by Spark Discharge", 6th Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference, pp. 1422–1423 Adelaide, 1977

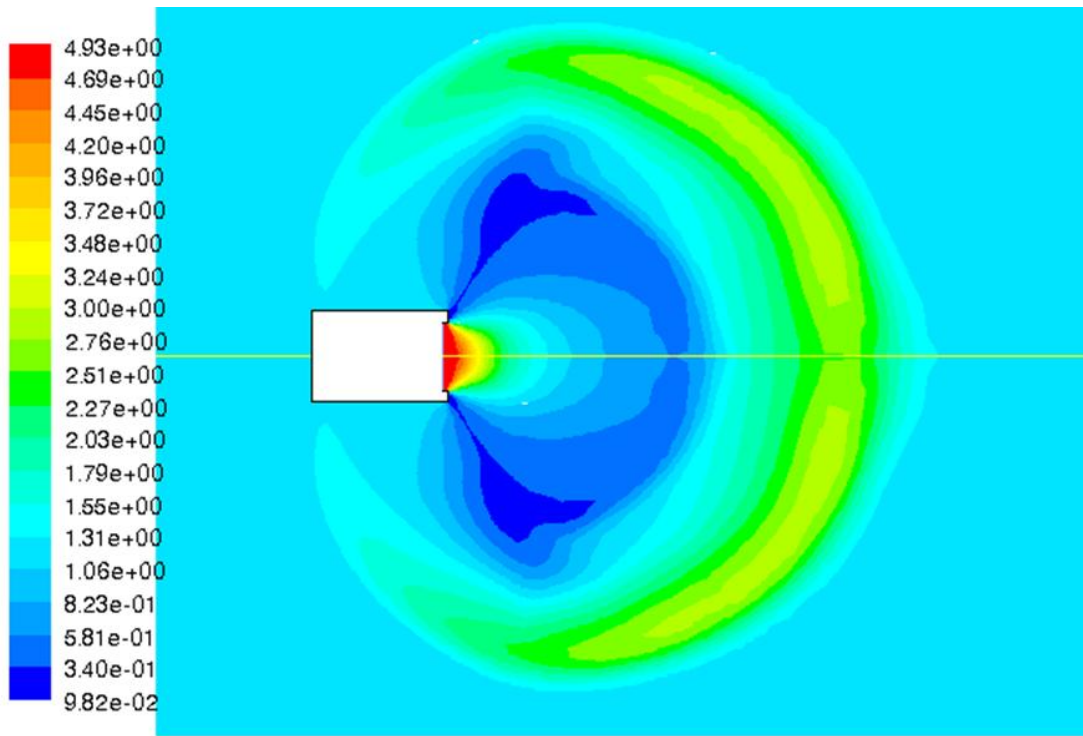
11. ПРИЛОЗИ

Прилог 1 - Резултати нумеричког моделирања методом коначних запремина

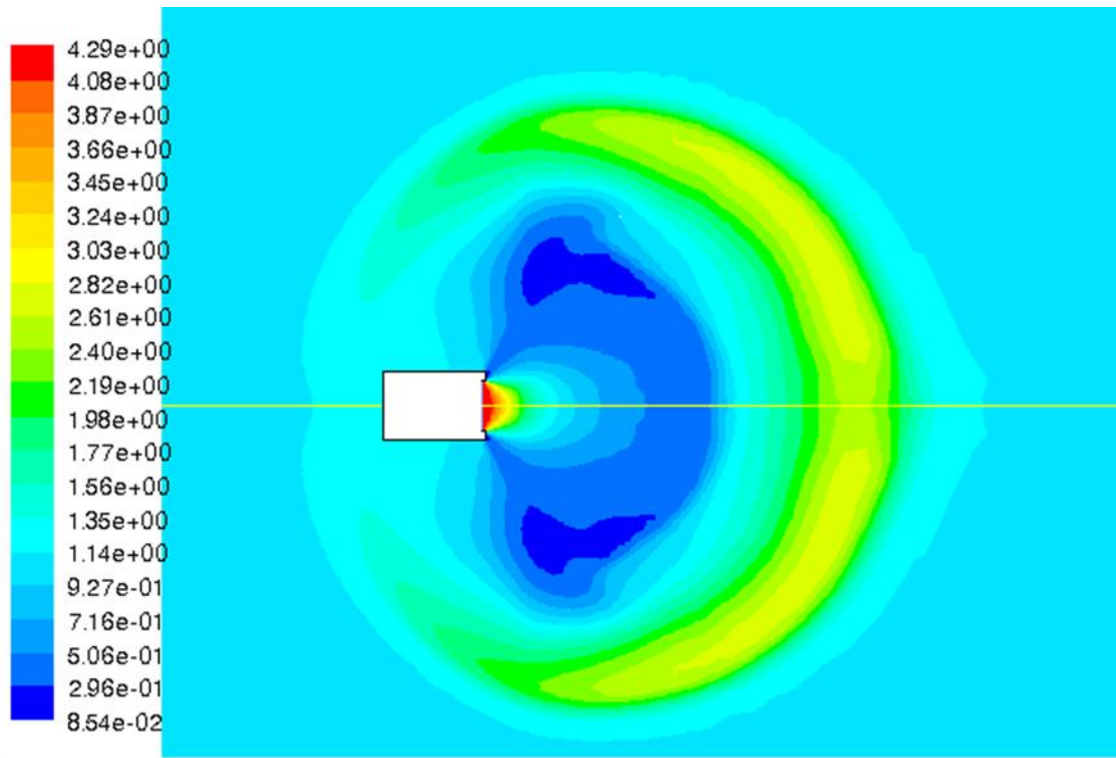
Прилог 1.1 - Цилиндрични уређај – Промена густине гаса током истицања



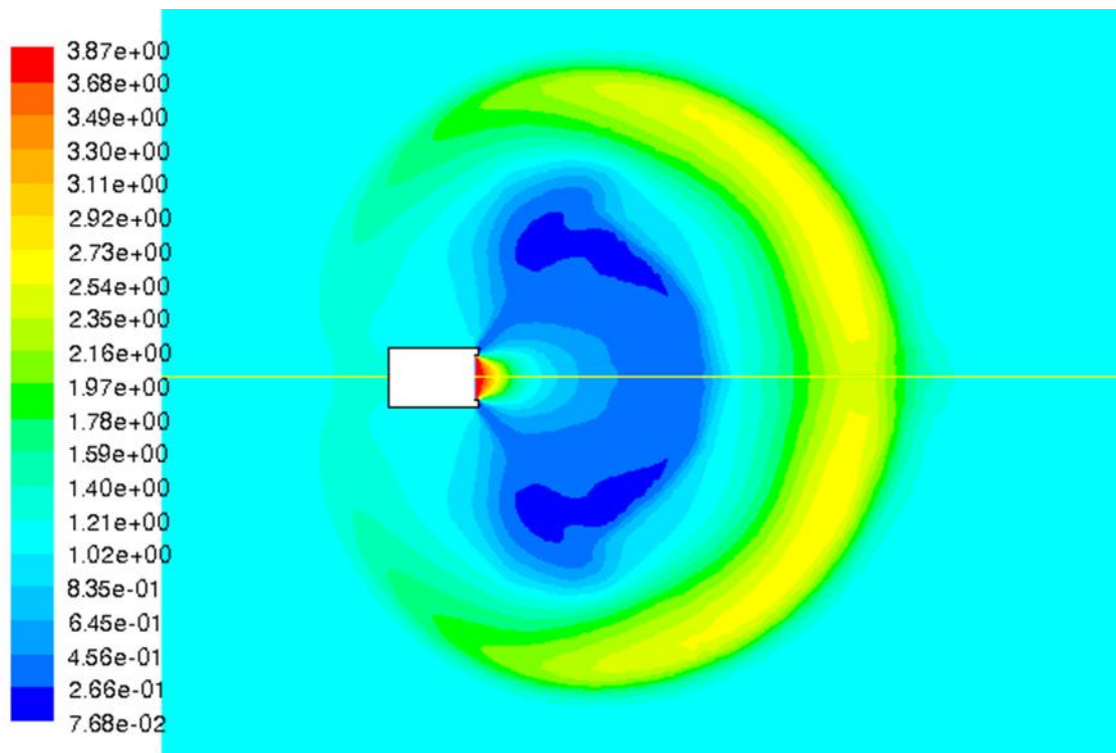
Contours of Density (kg/m3) (Time=2.1693e-04) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



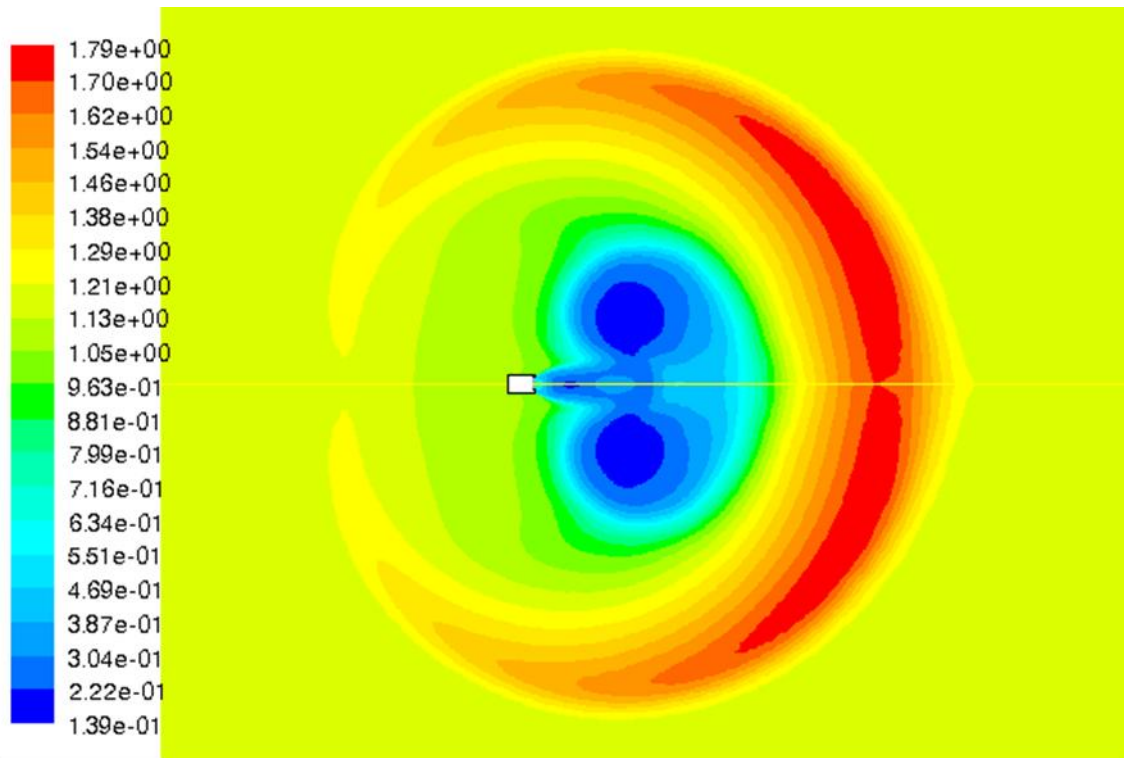
Contours of Density (kg/m3) (Time=6.8973e-04) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



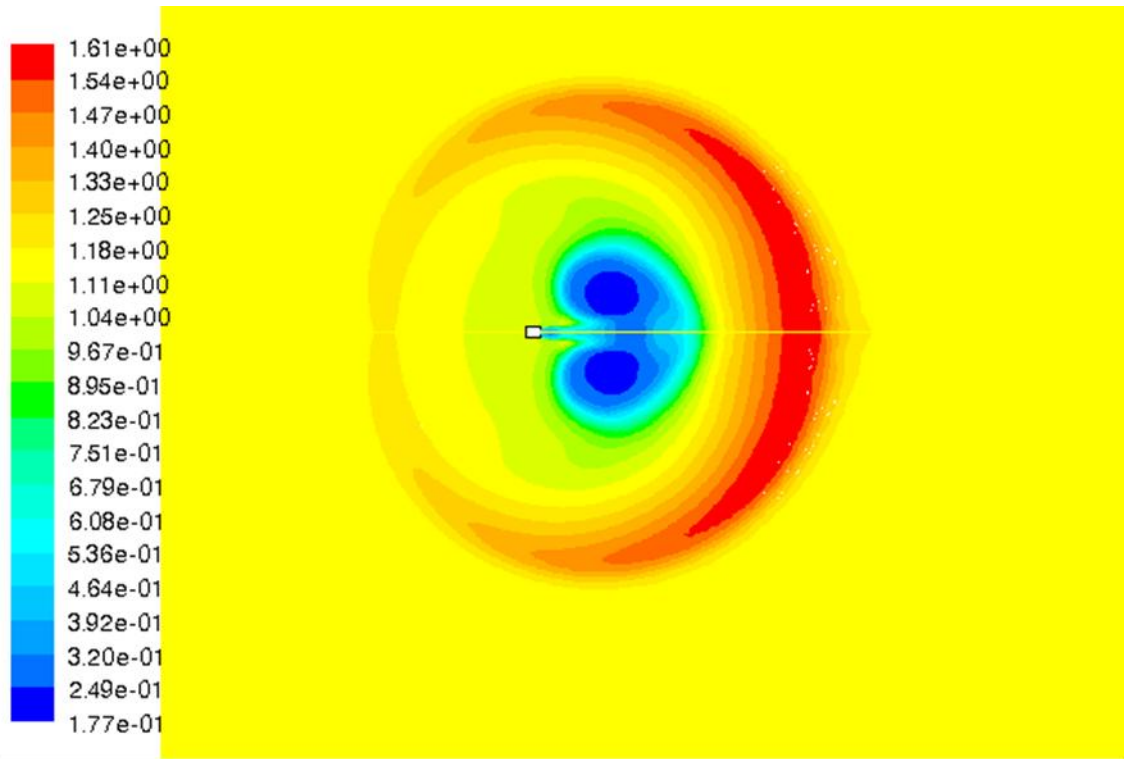
Contours of Density (kg/m3) (Time=9.3193e-04) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



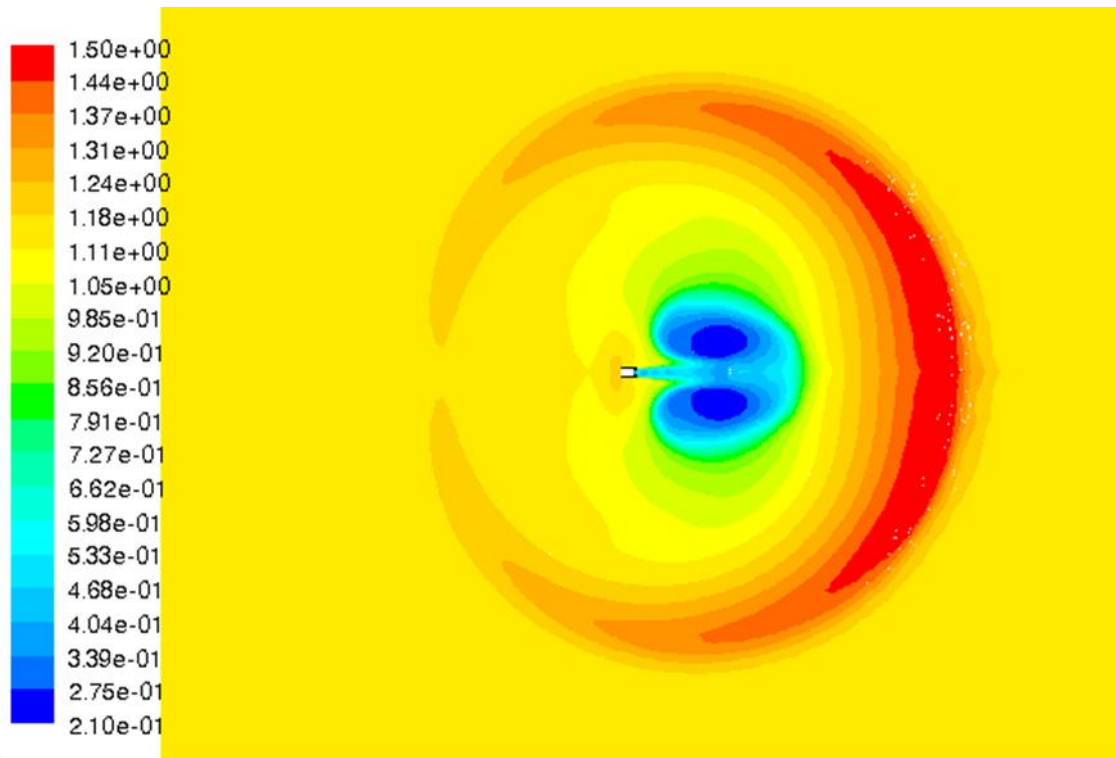
Contours of Density (kg/m3) (Time=1.1282e-03) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



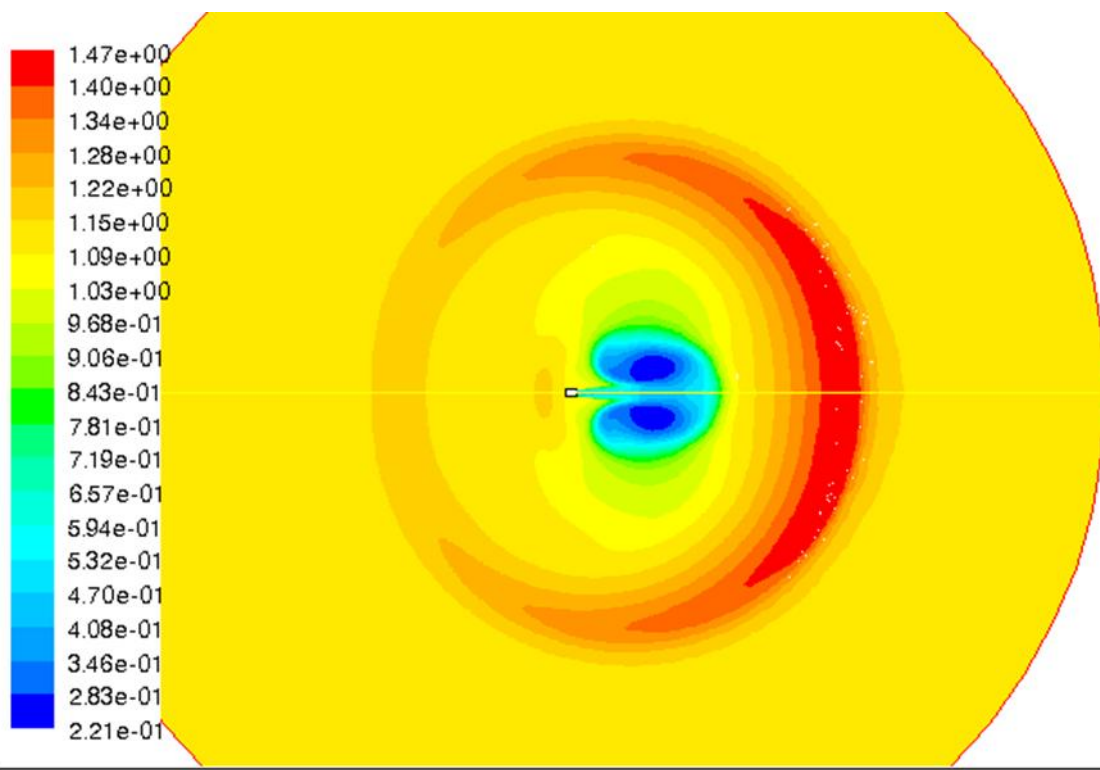
Contours of Density (kg/m3) (Time=5.2500e-03) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



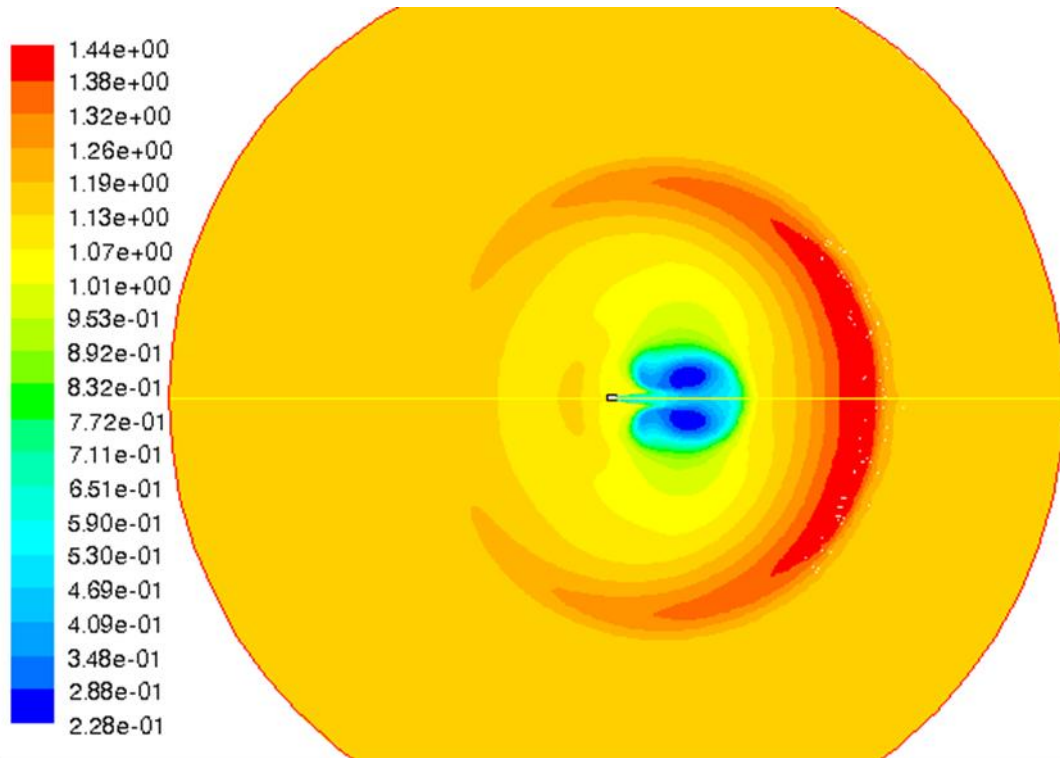
Contours of Density (kg/m3) (Time=7.5000e-03) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



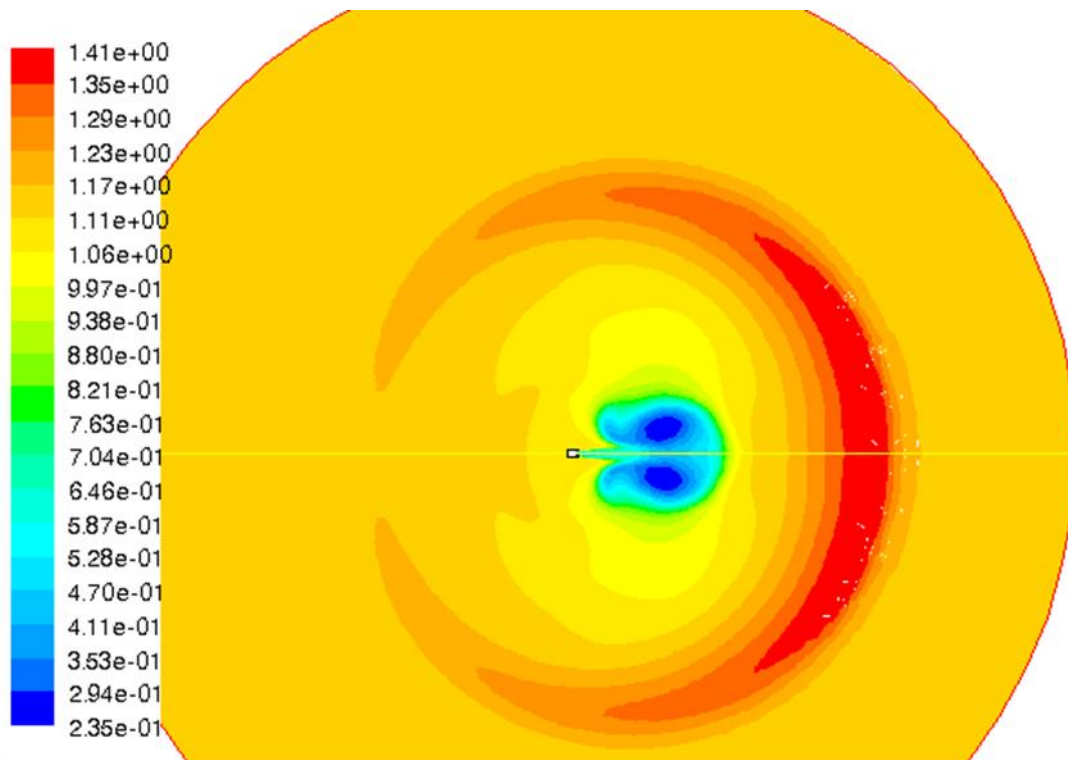
Contours of Density (kg/m3) (Time=1.0513e-02) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



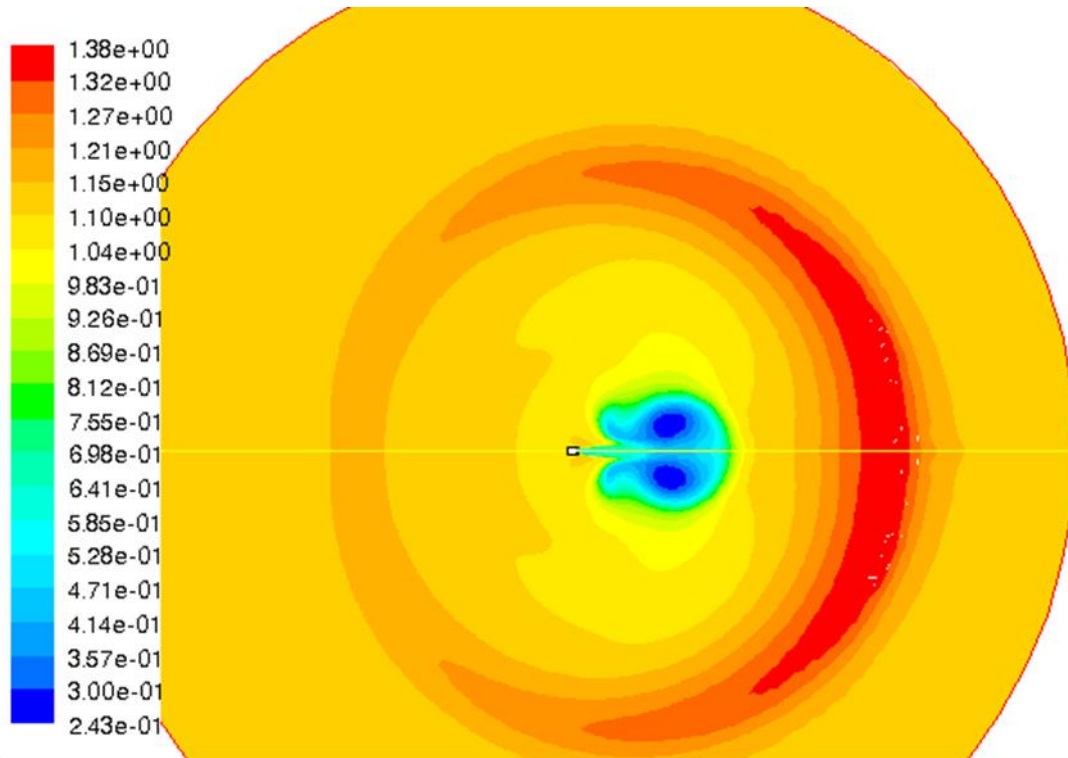
Contours of Density (kg/m3) (Time=1.1750e-02) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



Contours of Density (kg/m3) (Time=1.3000e-02) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

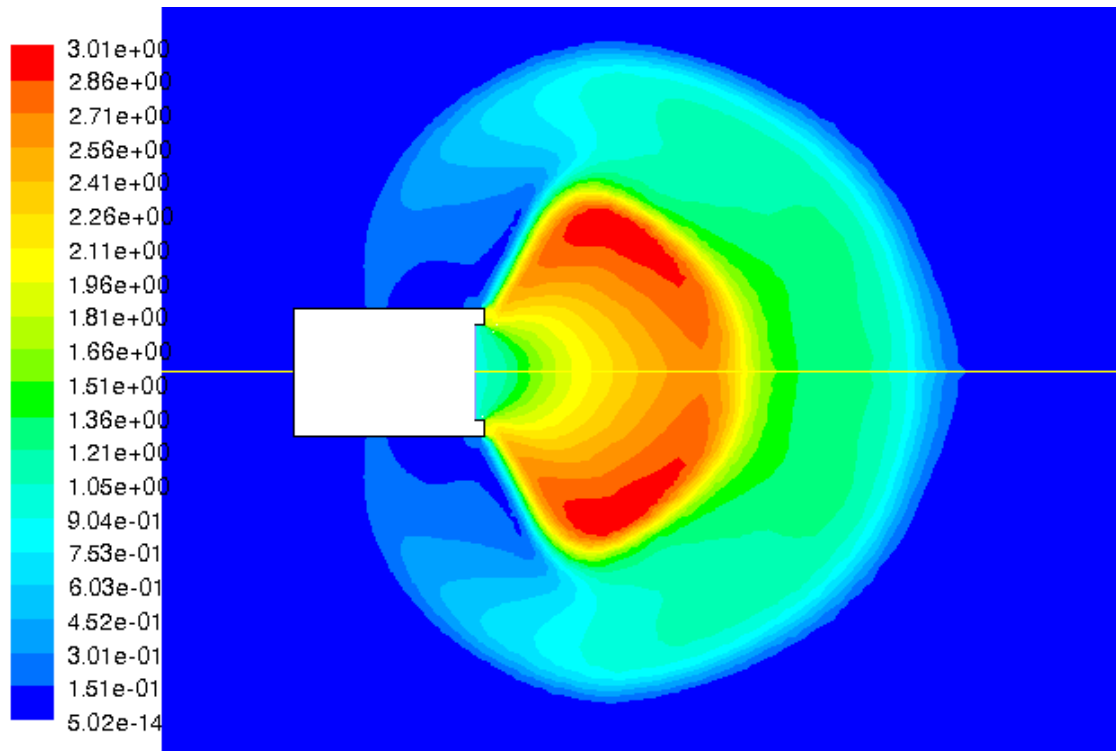


Contours of Density (kg/m3) (Time=1.4250e-02) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



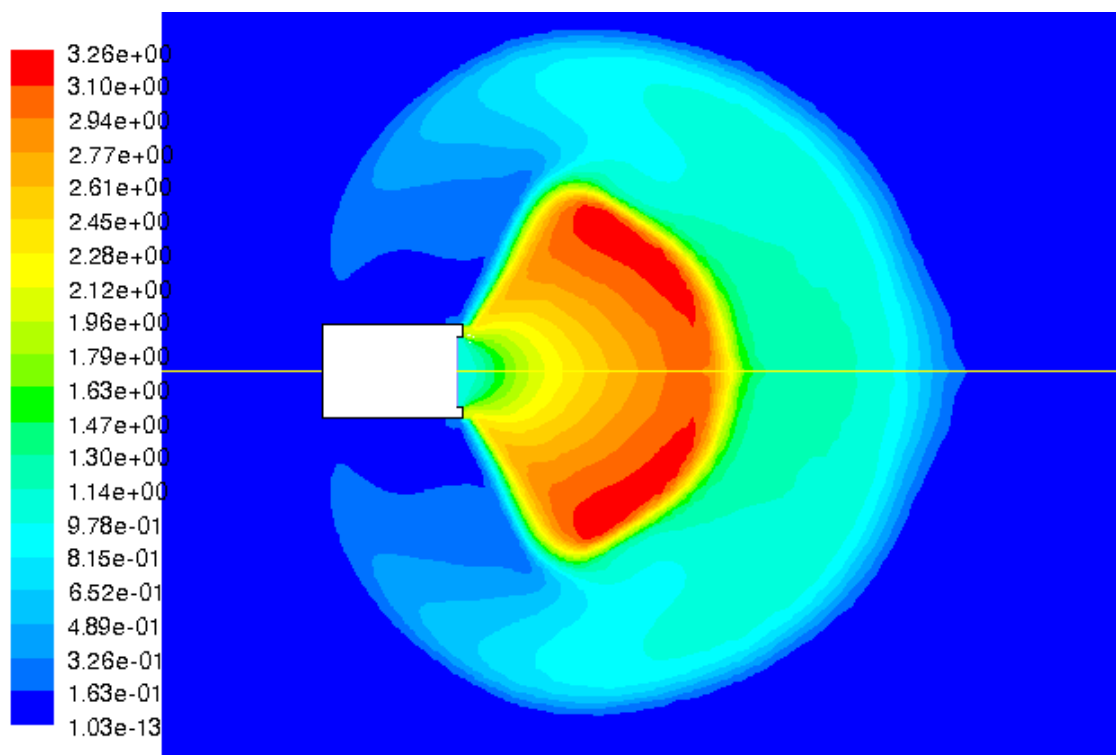
Contours of Density (kg/m3) (Time=1.5500e-02) May 17, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

*Прилог 1.2 - Цилиндрични уређај – Промена Маховог броја струје гаса
током истицања*



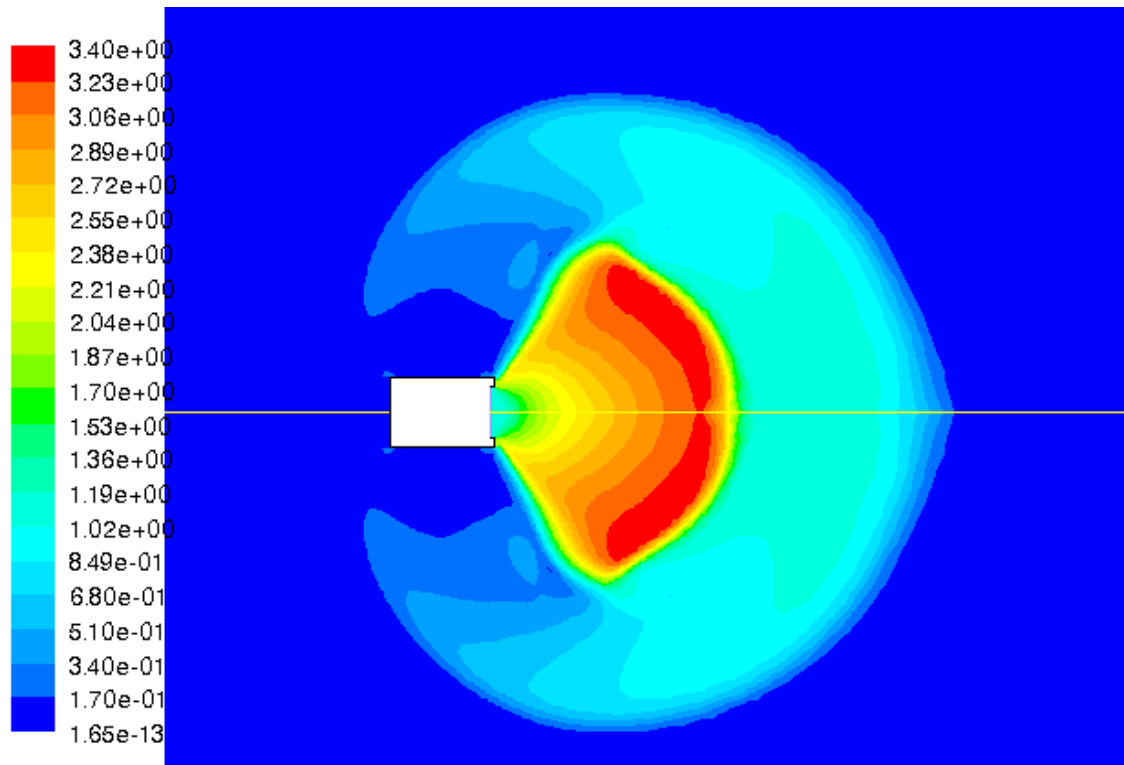
Contours of Mach Number (Time=4.5125e-04)

May 17, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



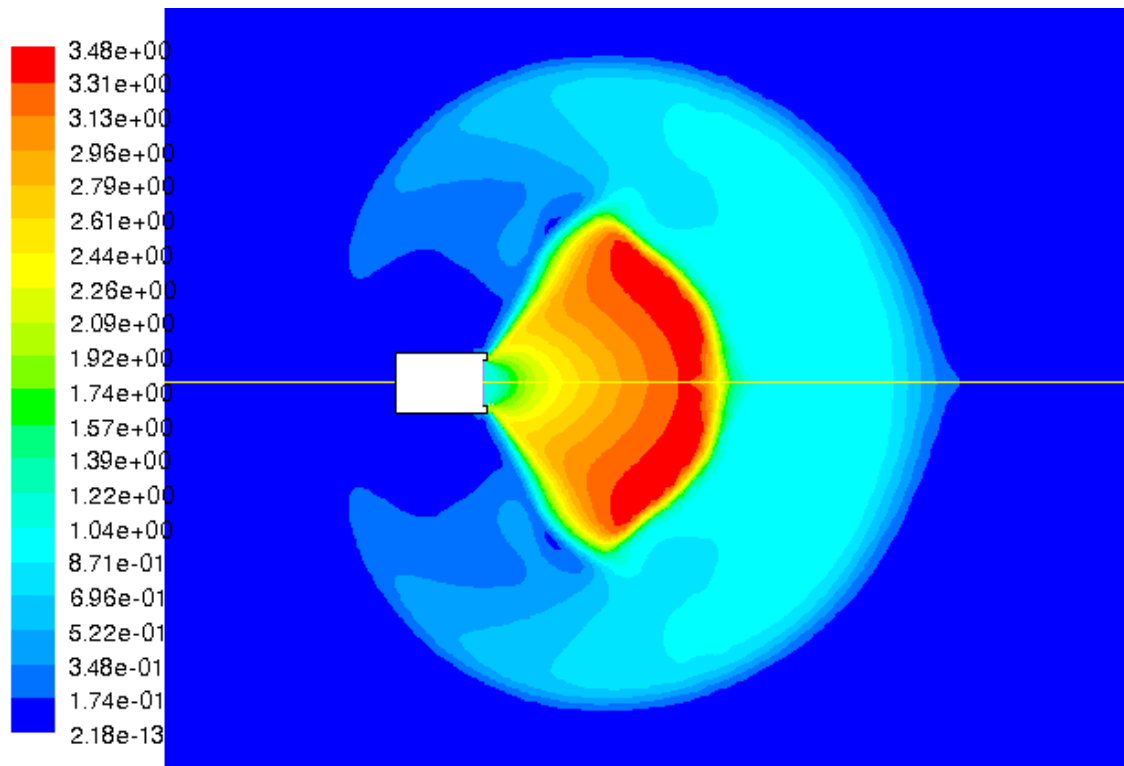
Contours of Mach Number (Time=6.8973e-04)

May 17, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



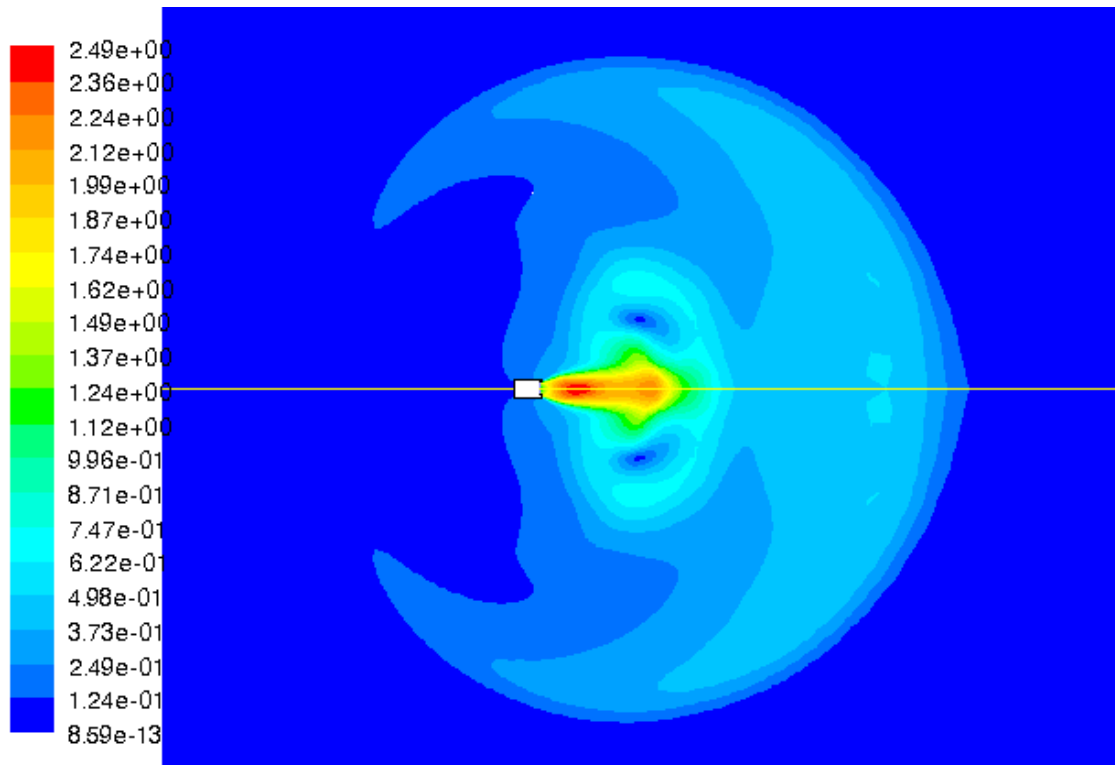
Contours of Mach Number (Time=9.3193e-04)

FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady) May 17, 2013



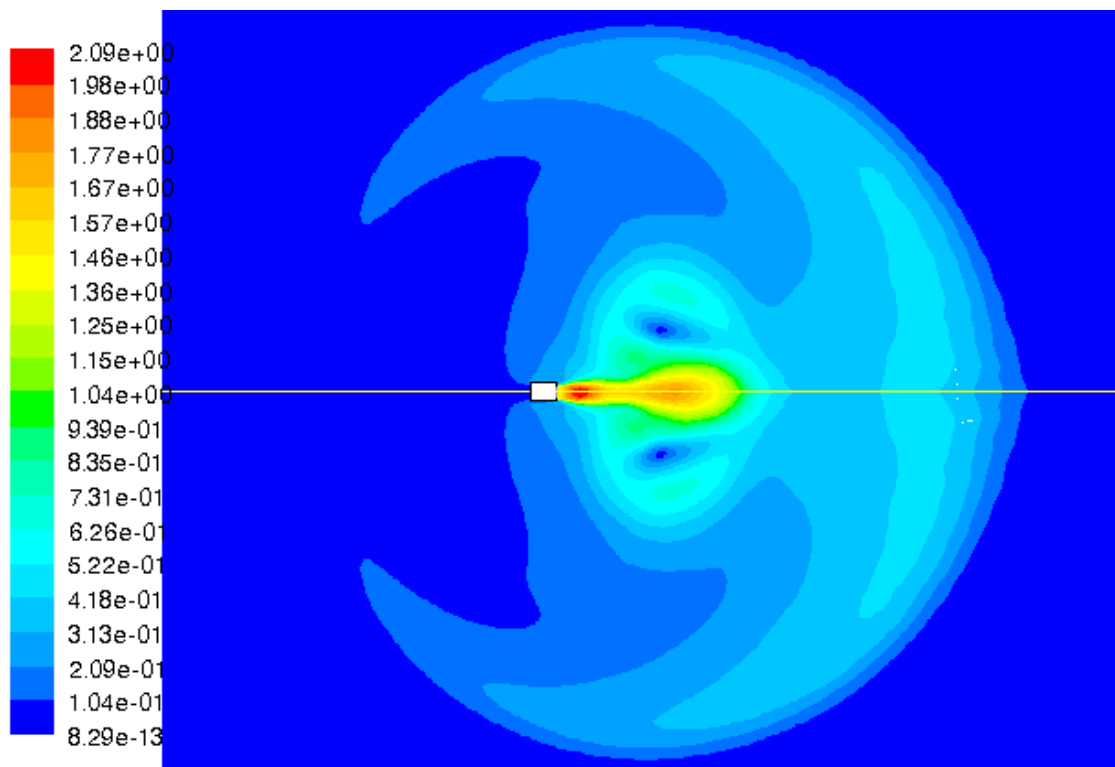
Contours of Mach Number (Time=1.1282e-03)

FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady) May 17, 2013



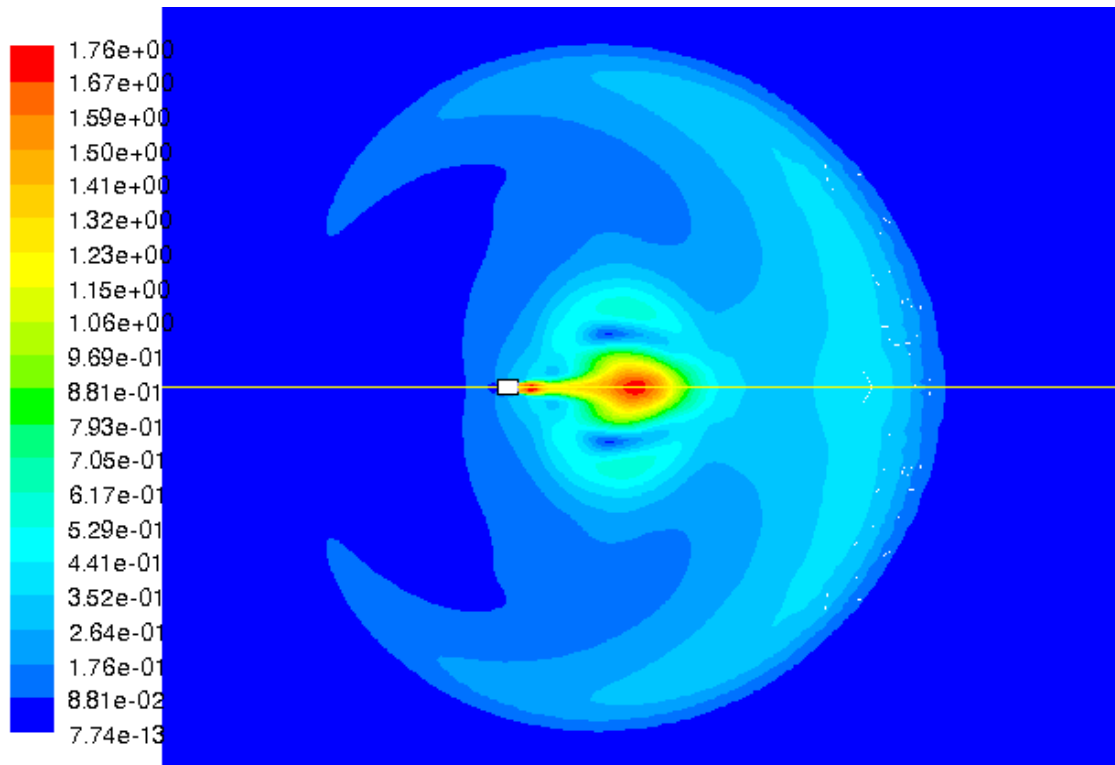
Contours of Mach Number (Time=5.2500e-03)

May 17, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



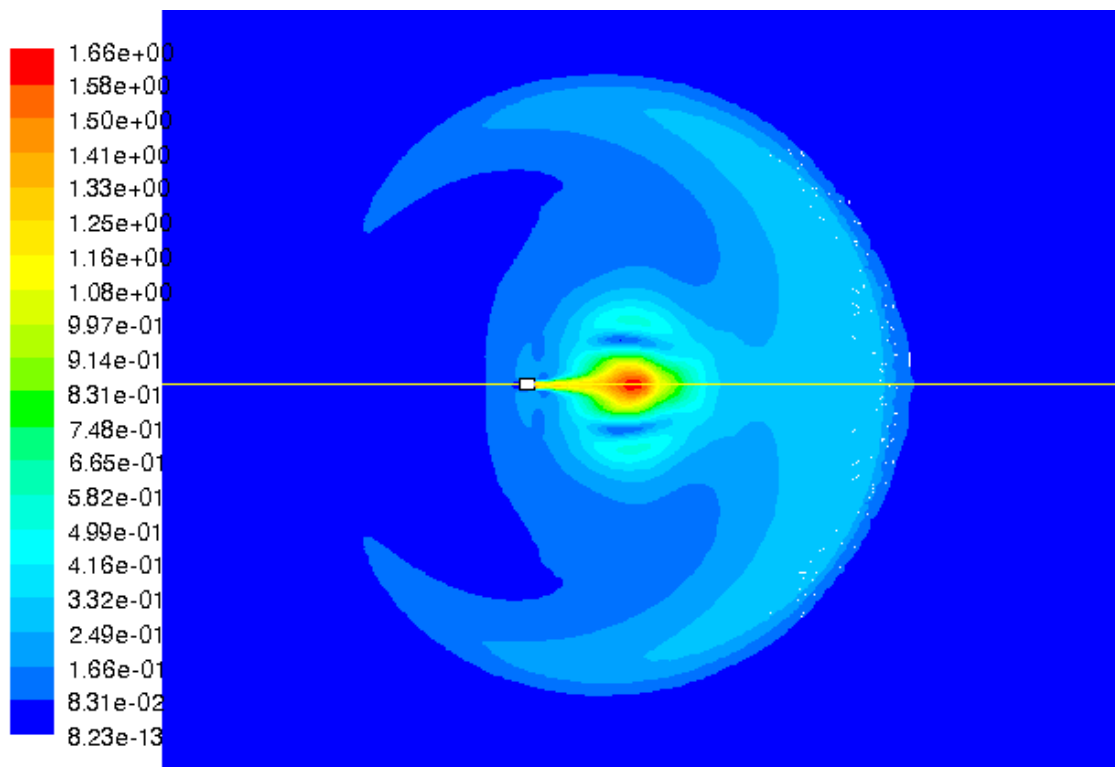
Contours of Mach Number (Time=6.2499e-03)

May 17, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



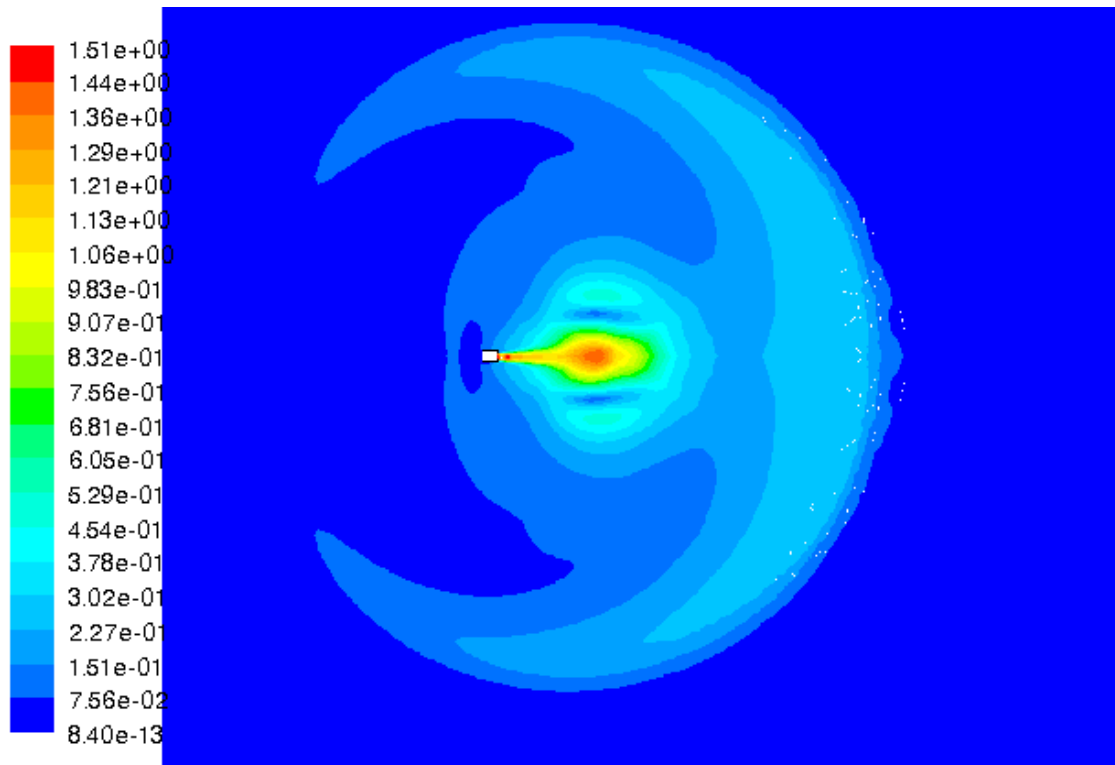
Contours of Mach Number (Time=7.5000e-03)

May 17, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



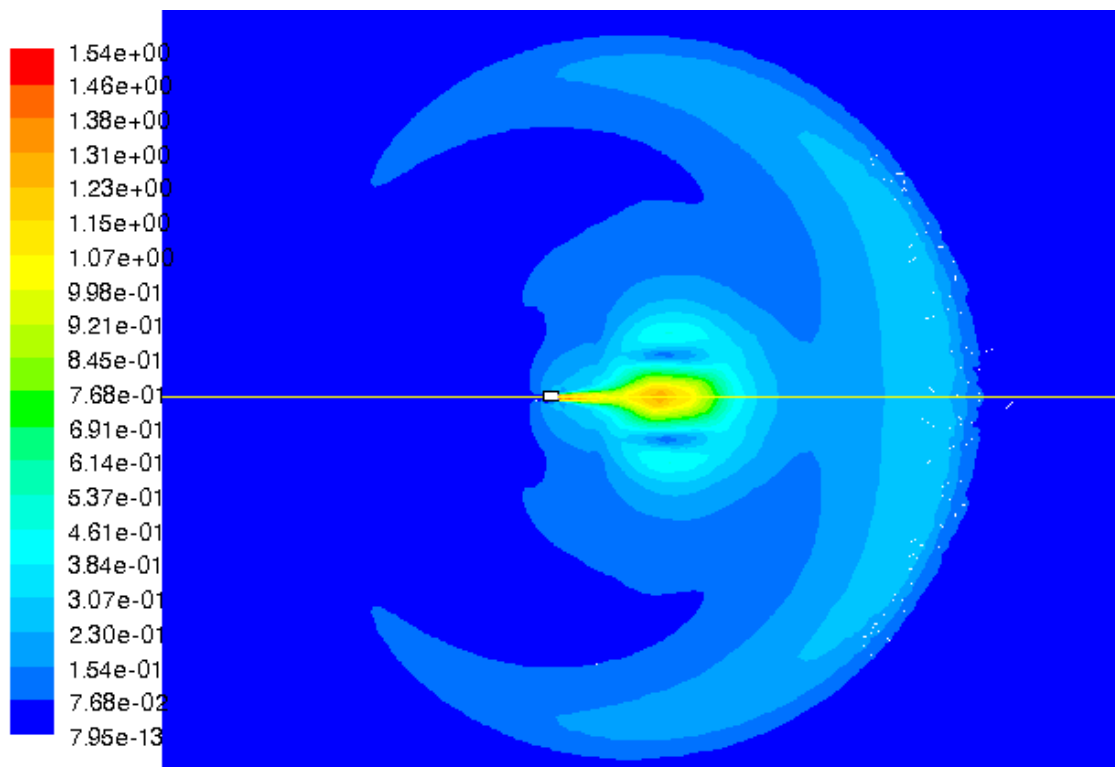
Contours of Mach Number (Time=8.9999e-03)

May 17, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



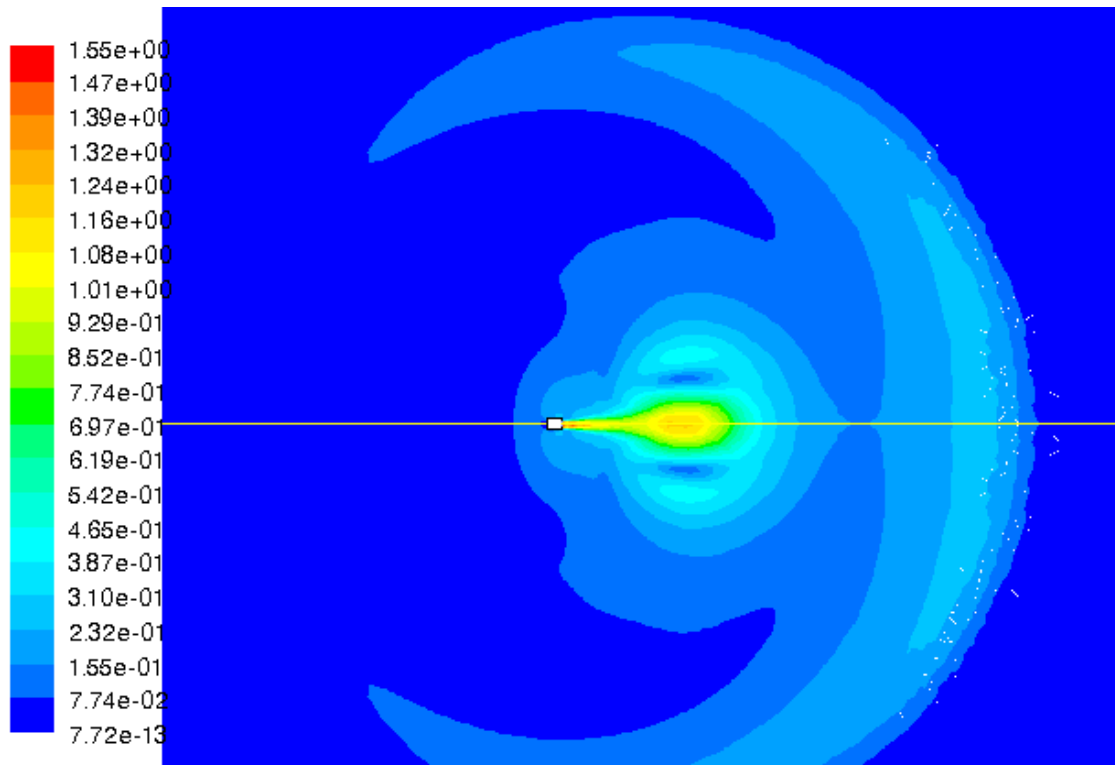
Contours of Mach Number (Time=1.0513e-02)

FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady) May 17, 2013



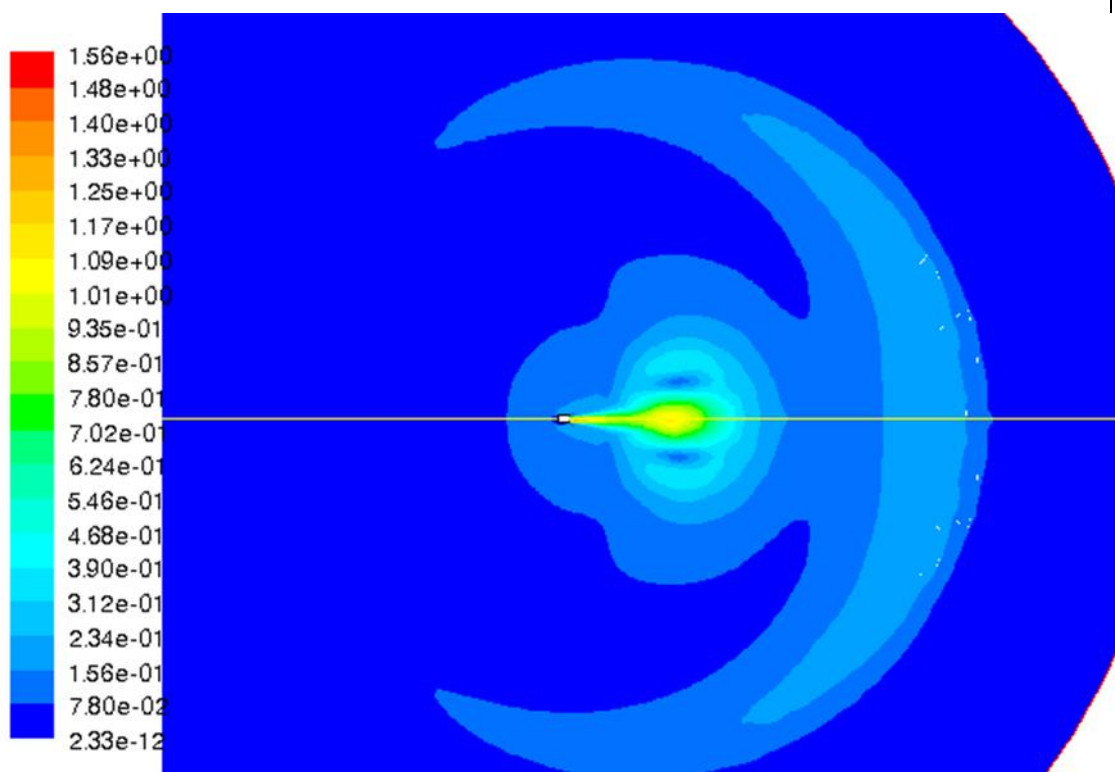
Contours of Mach Number (Time=1.1750e-02)

FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady) May 17, 2013



Contours of Mach Number (Time=1.3000e-02)

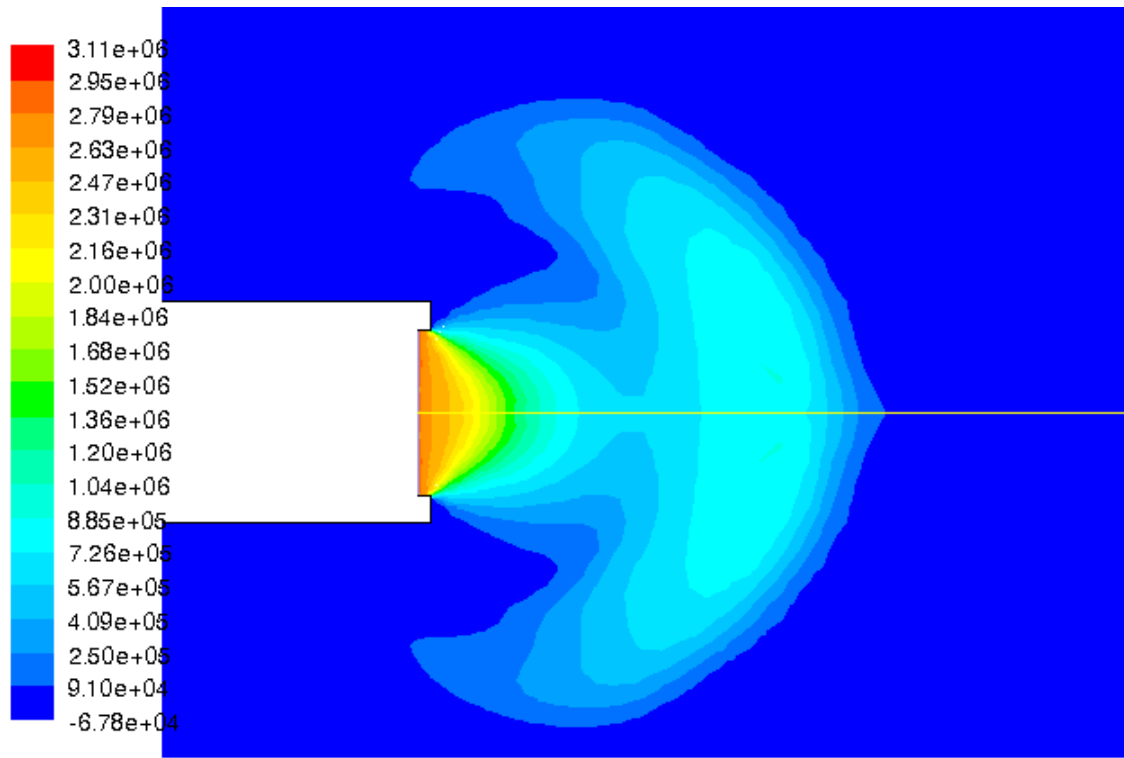
May 17, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



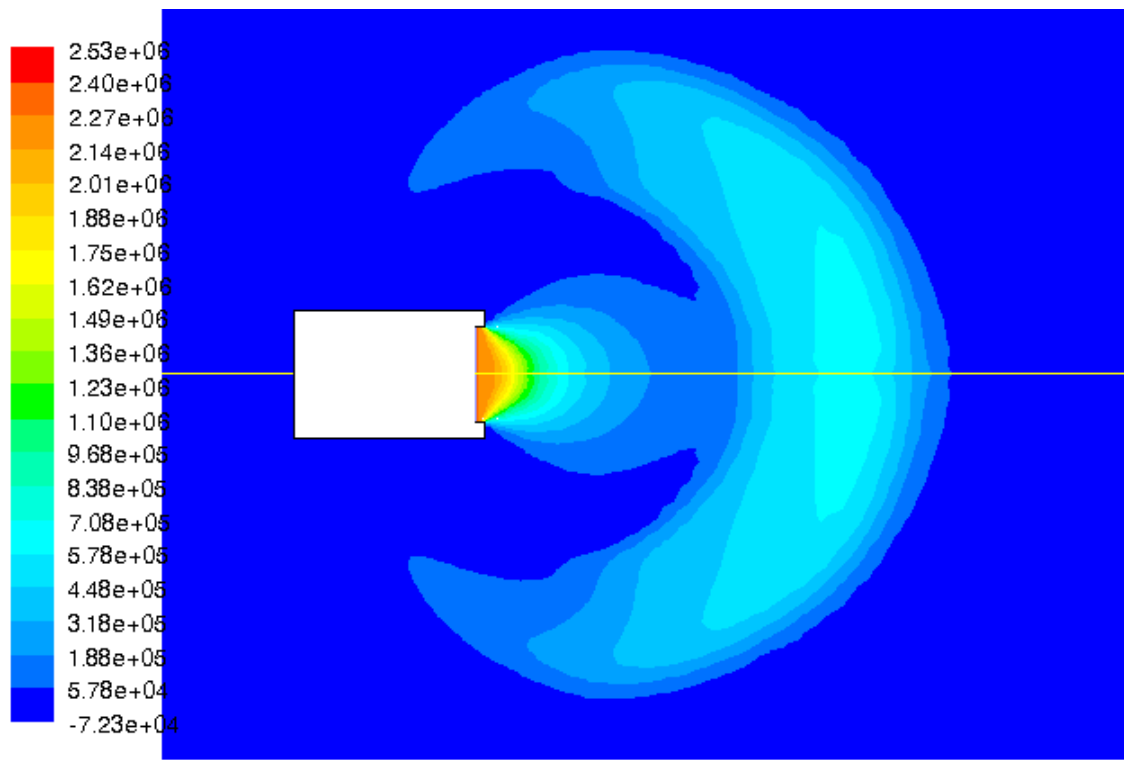
Contours of Mach Number (Time=1.5500e-02)

May 17, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

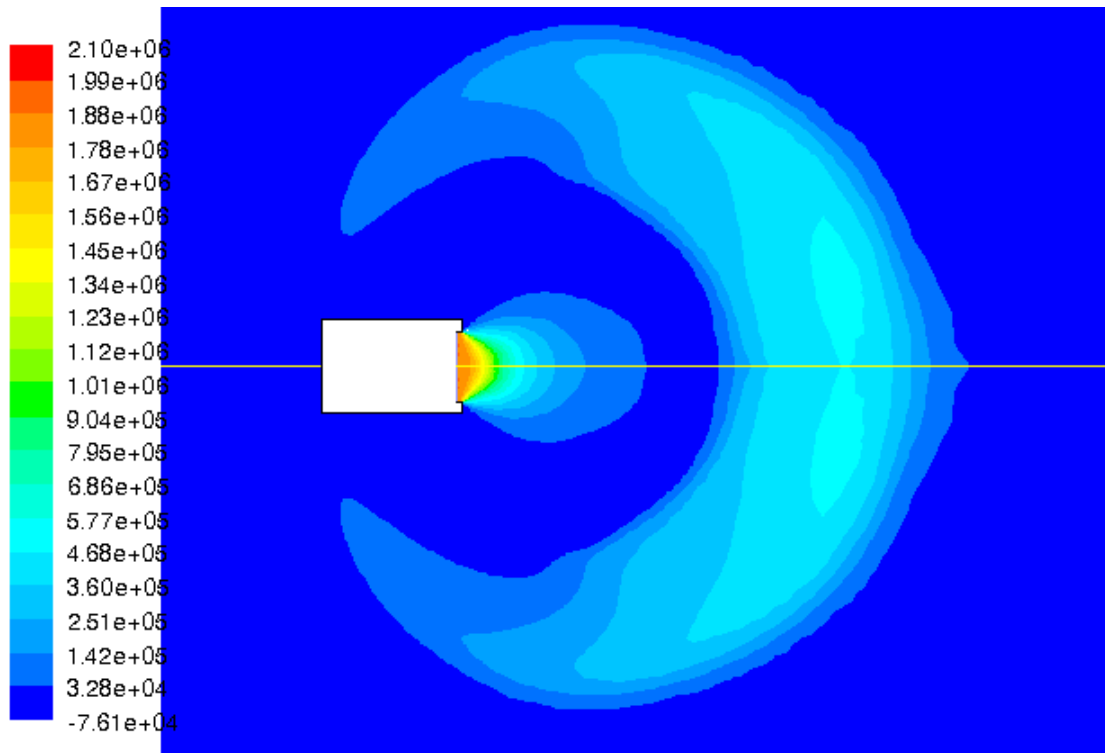
Прилог 1.3 - Цилиндрични уређај – Промена притиска гаса током истицања



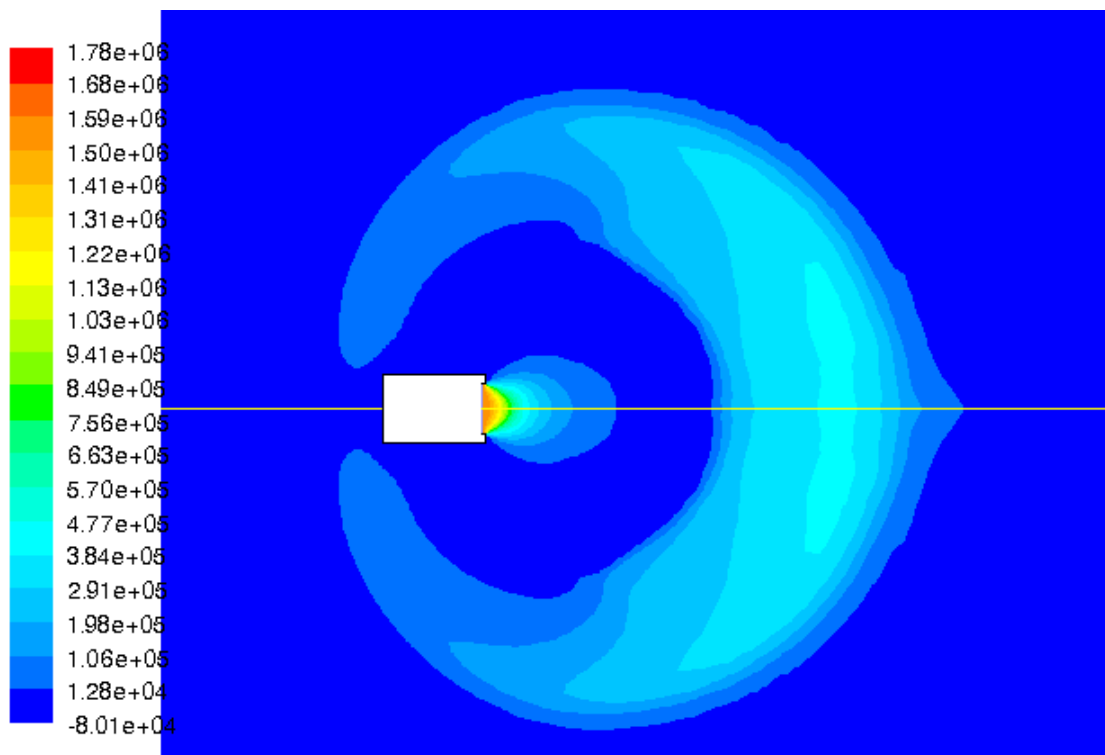
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=2.1693e-04) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



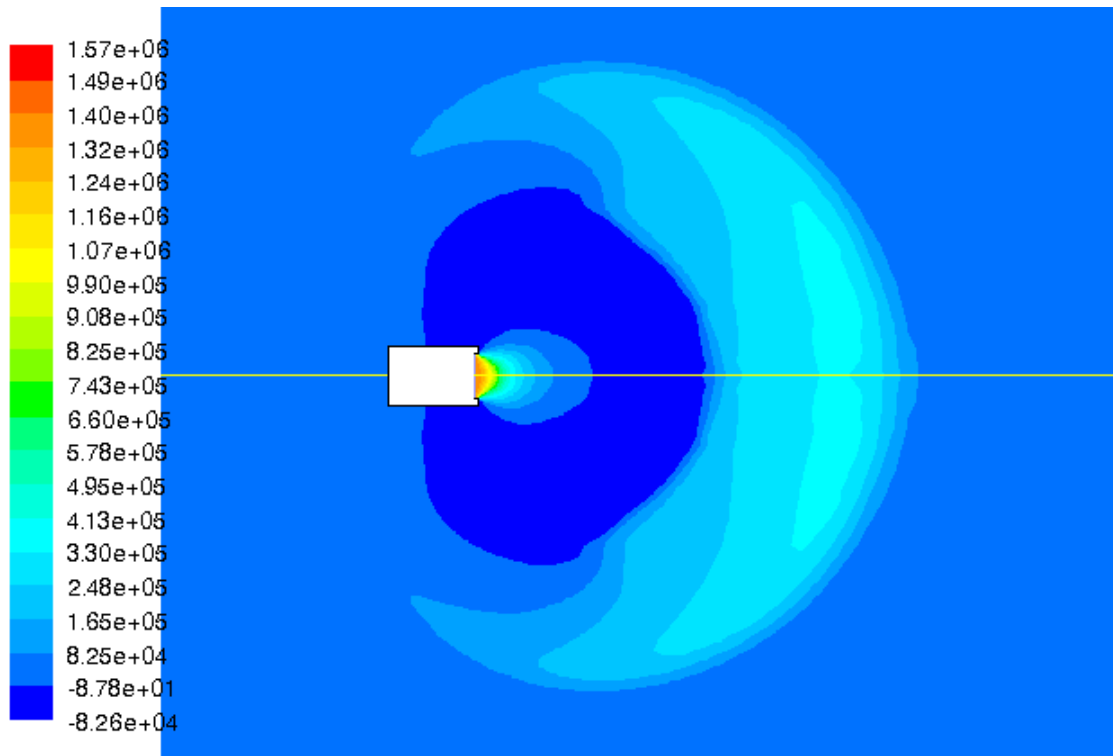
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=4.5125e-04) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



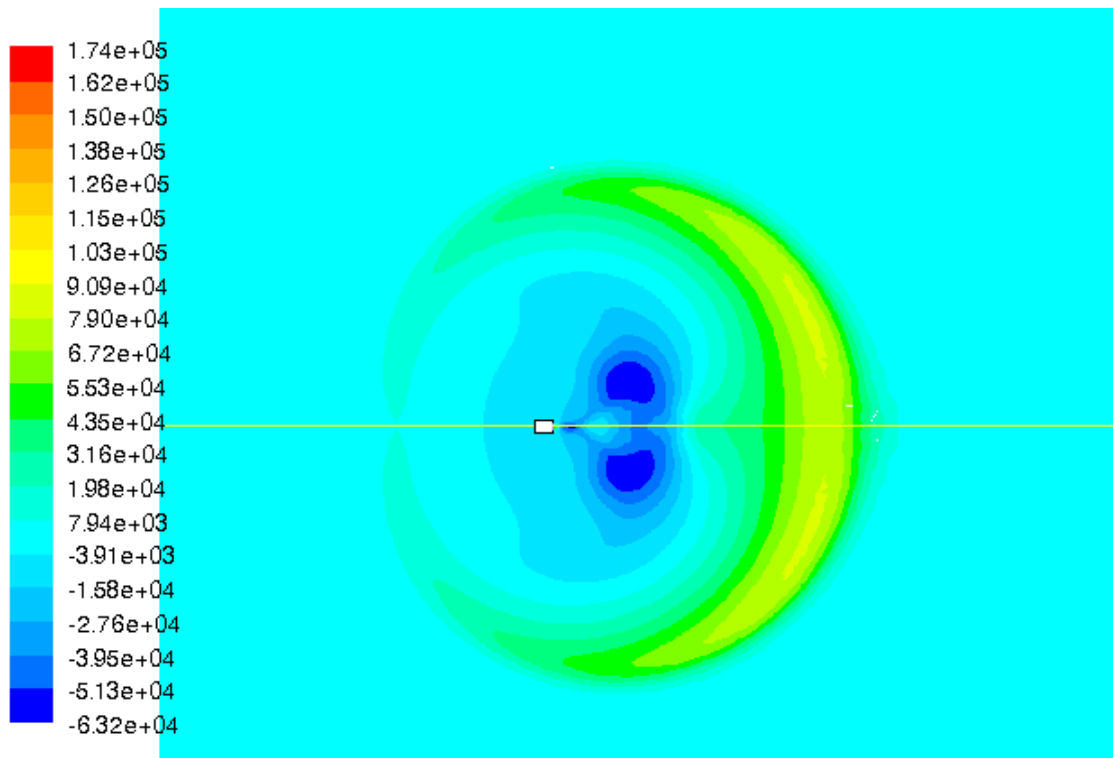
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=6.8973e-04) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



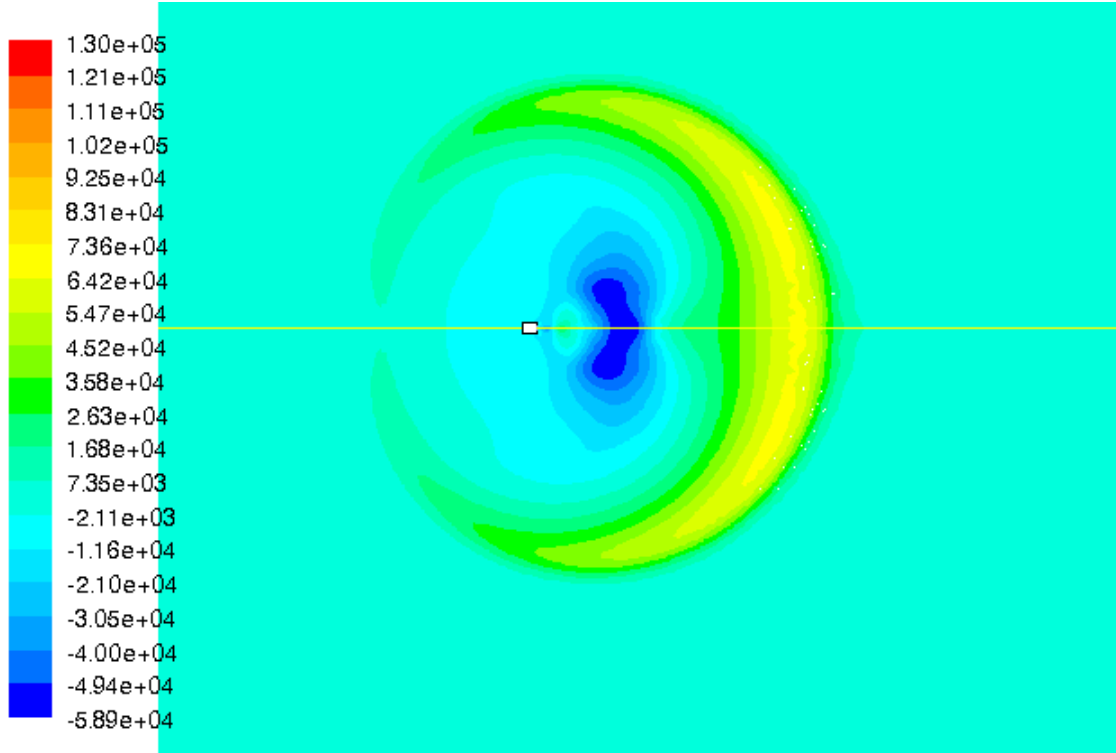
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.3193e-04) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



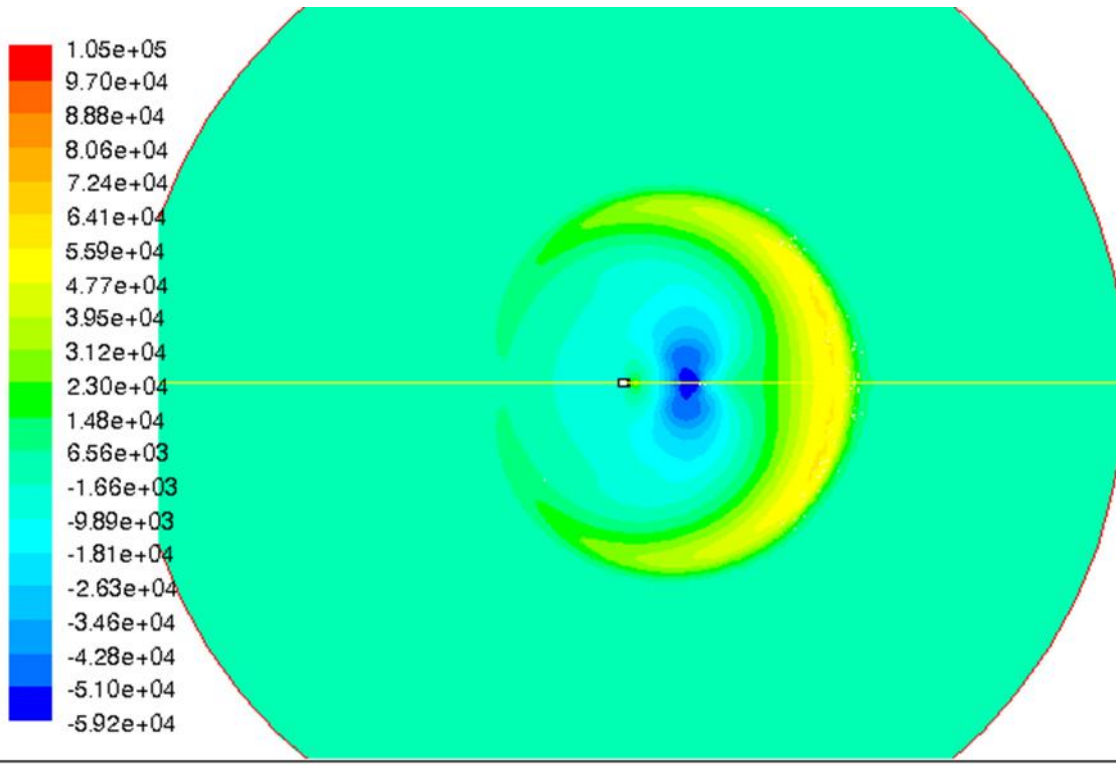
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.1282e-03) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



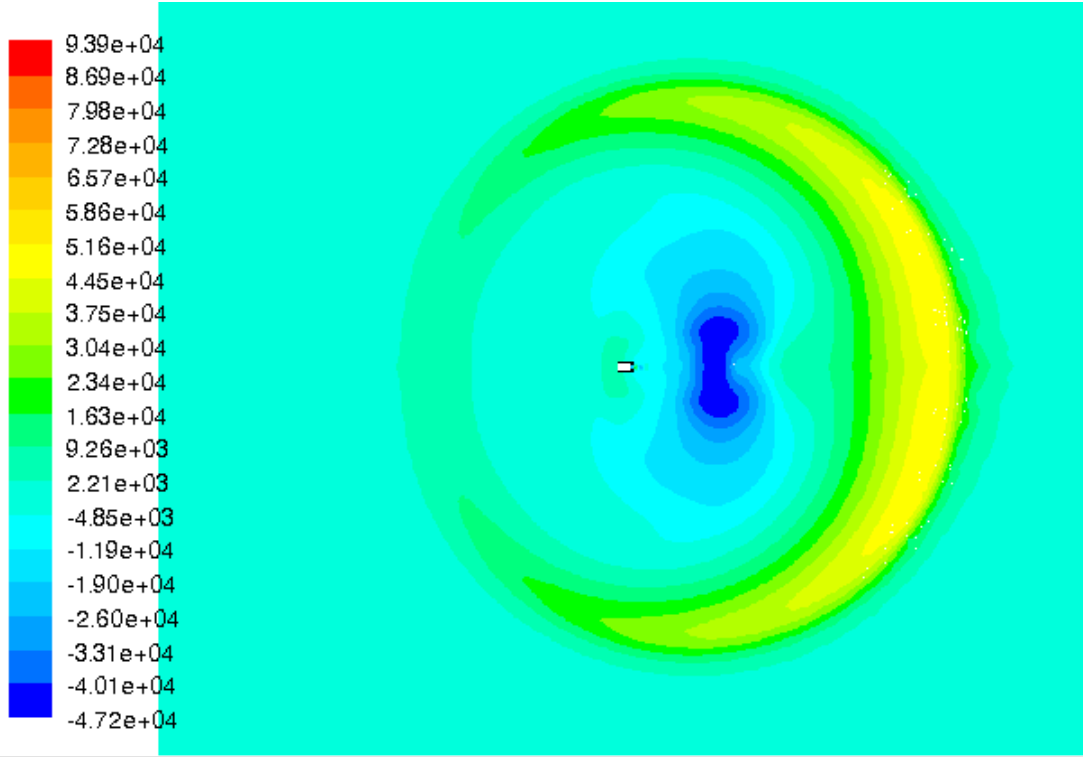
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=6.2499e-03) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



Contours of Static Pressure (pascal) (Time=7.5000e-03) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



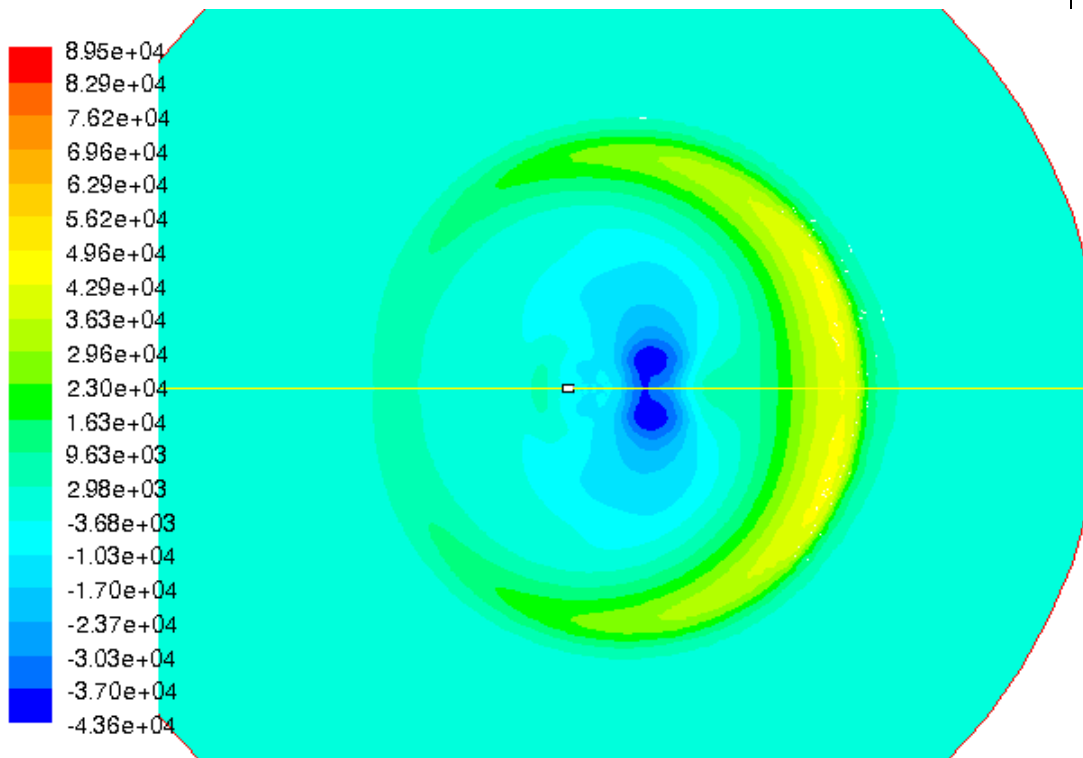
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=8.9999e-03) May 17, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.0513e-02)

May 17, 201

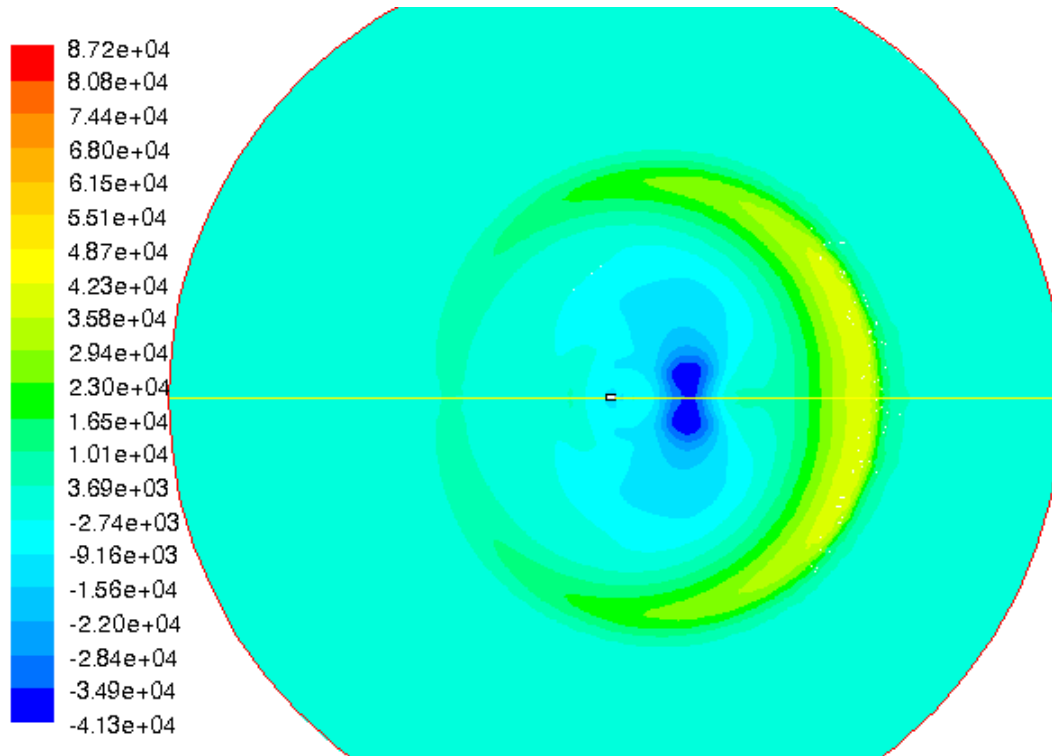
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



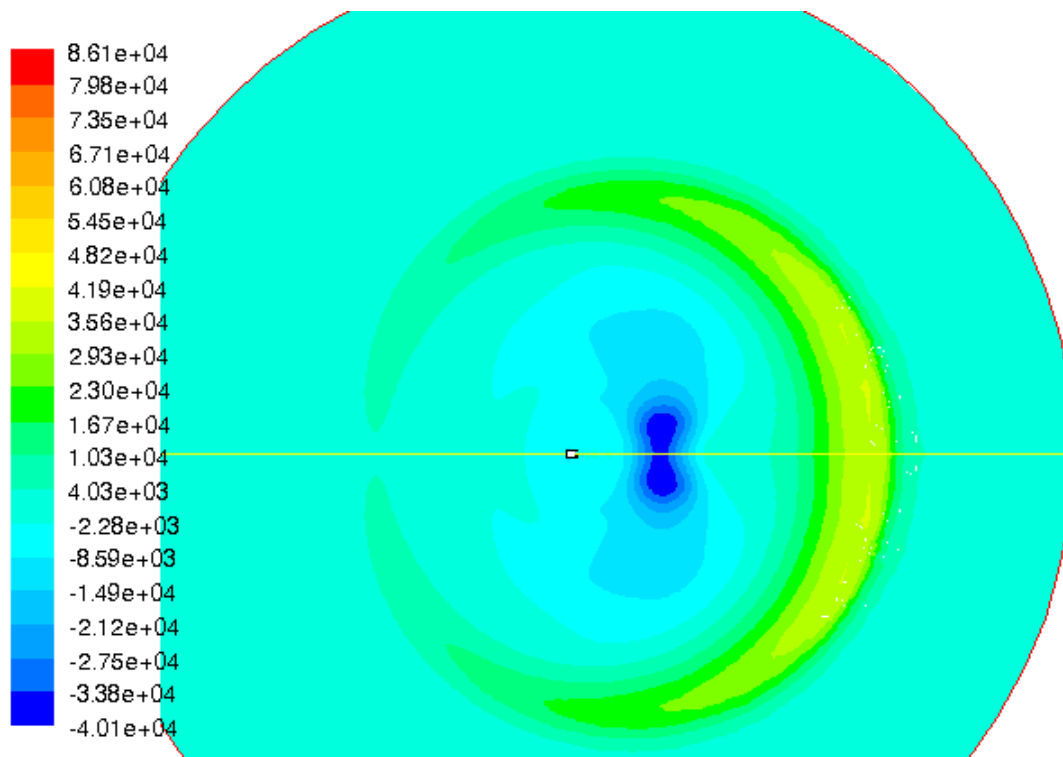
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.1750e-02)

May 17, 201

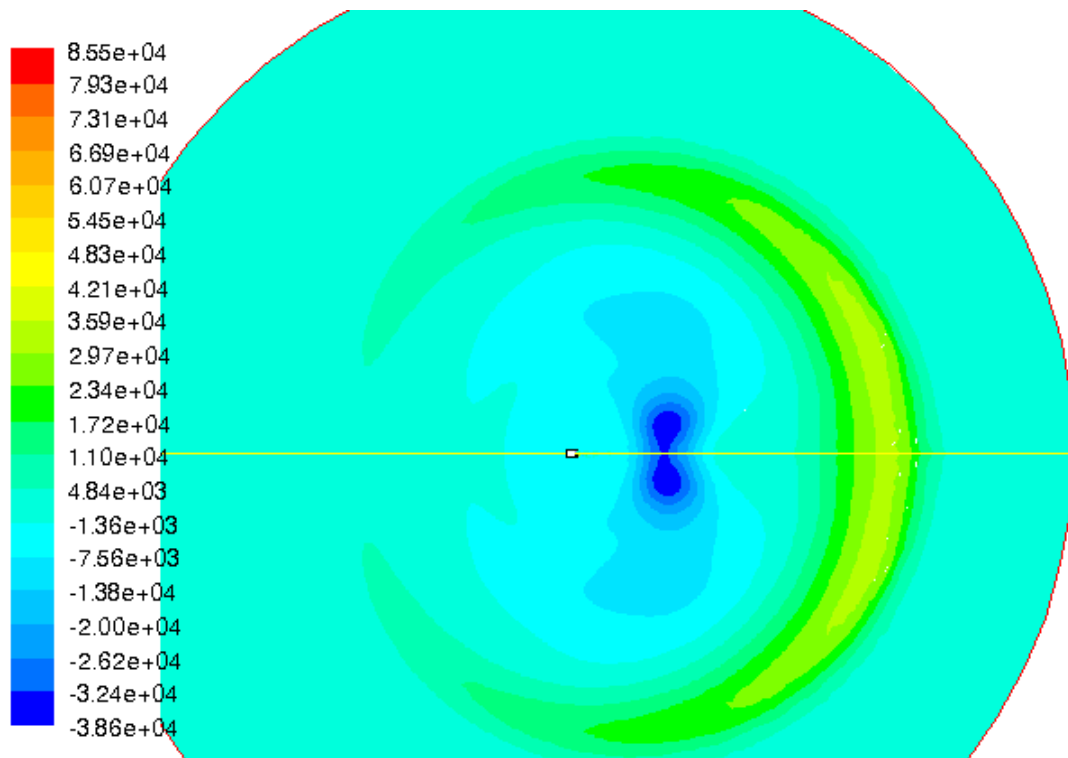
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.3000e-02) May 17, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

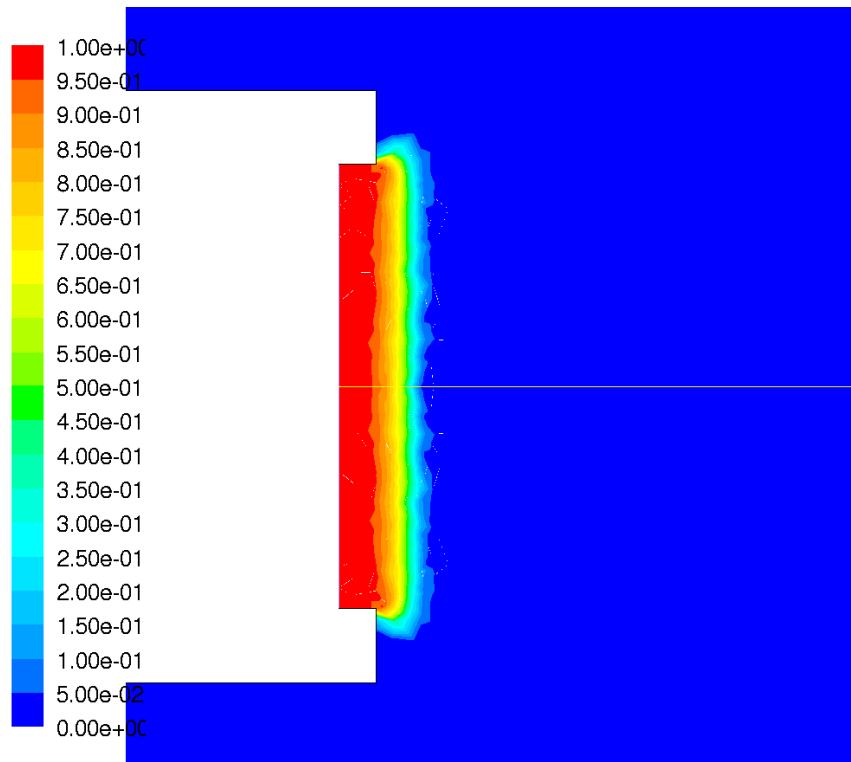


Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.4250e-02) May 17, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

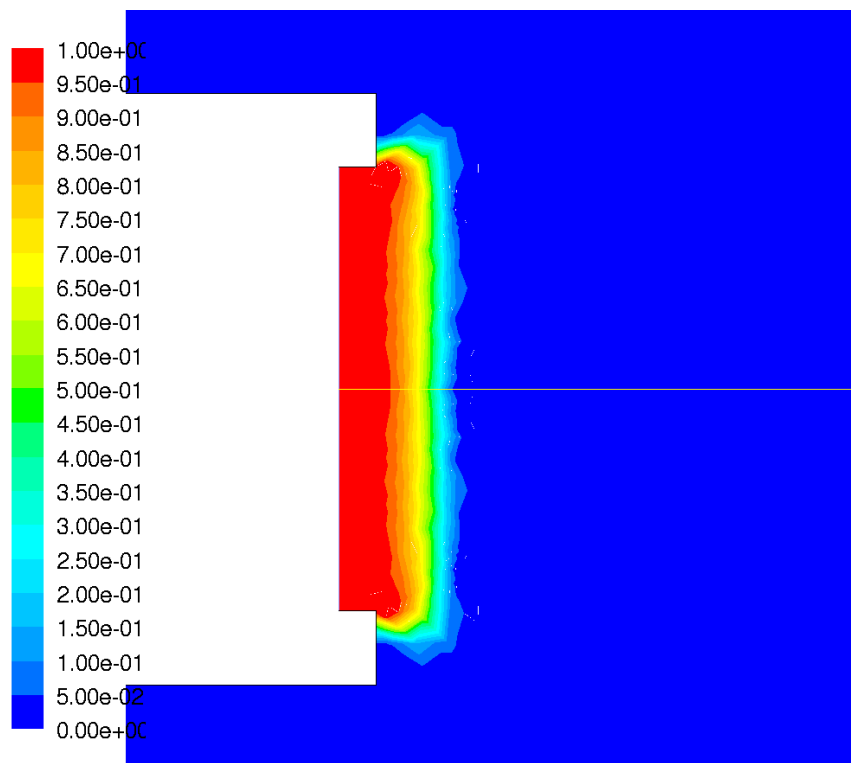


Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.5500e-02) May 17, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

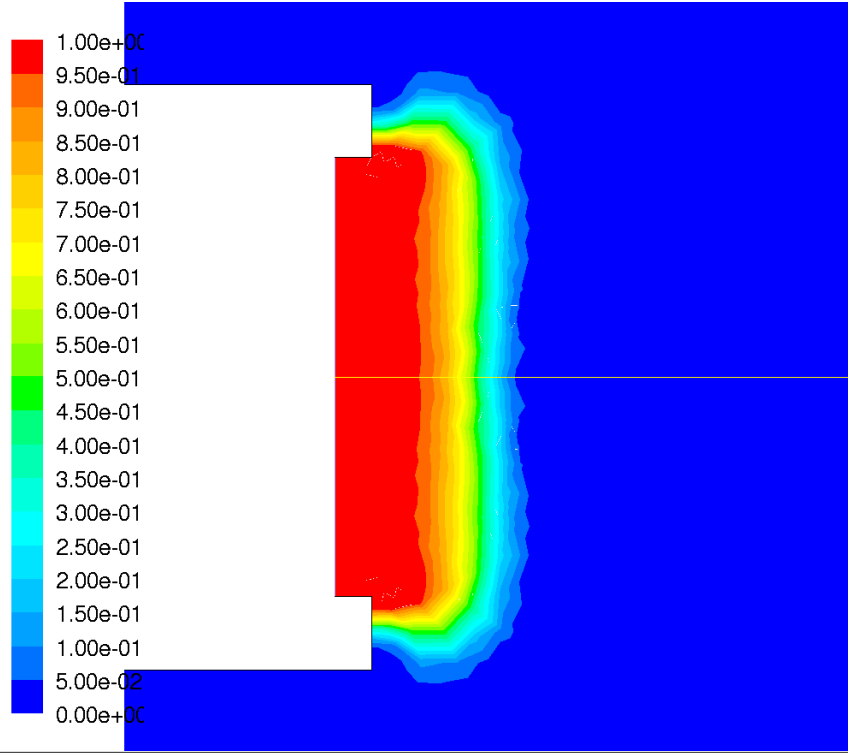
Прилог 1.4 - Цилиндрични уређај – Промена масеног учешћа продуката сагоревања током истицања



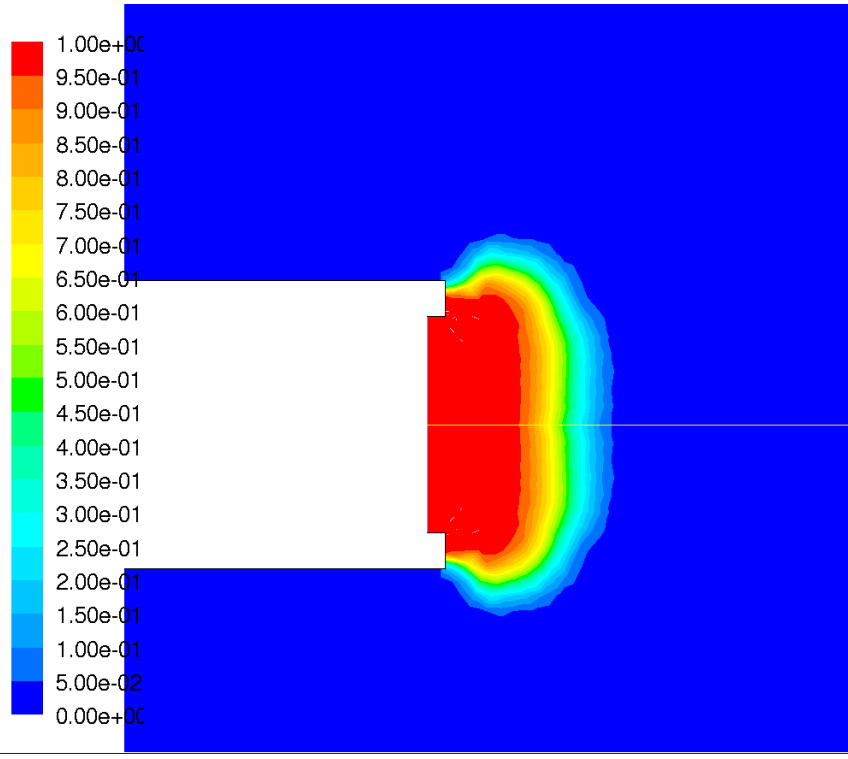
Contours of Mass fraction of propellant (Time=1.5163e-05) Sep 11, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



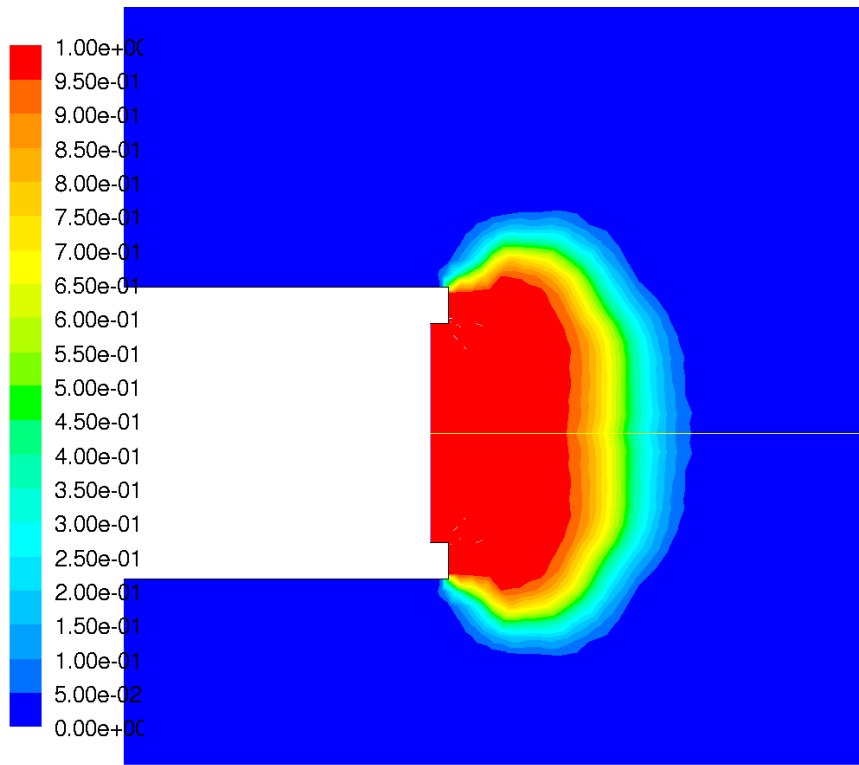
Contours of Mass fraction of propellant (Time=2.0692e-05) Sep 11, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



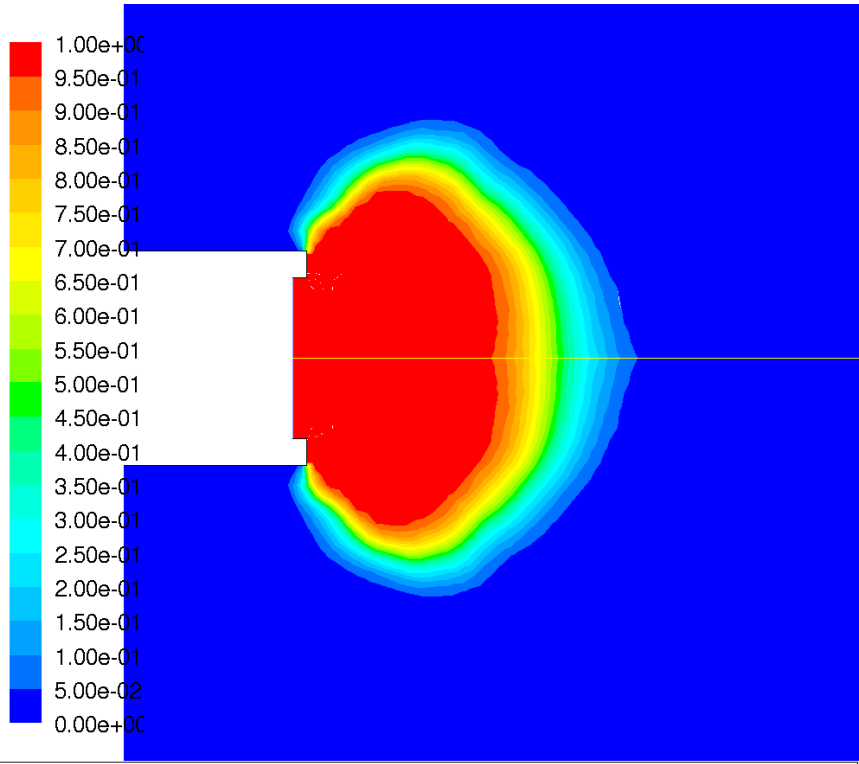
Contours of Mass fraction of propellant (Time=3.2609e-05) Sep 11, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



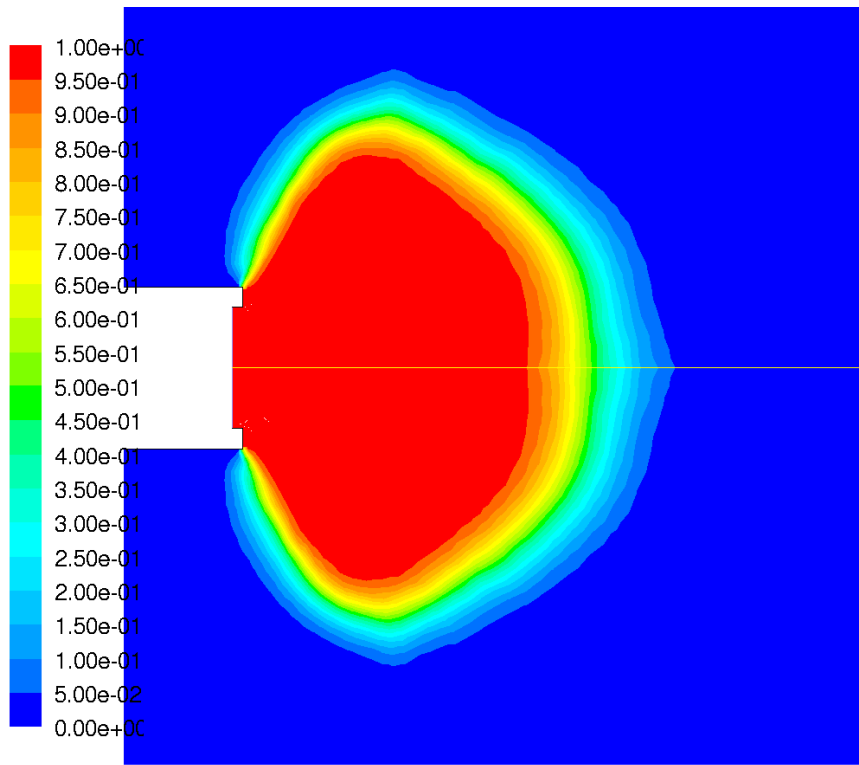
Contours of Mass fraction of propellant (Time=6.6168e-05) Sep 11, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



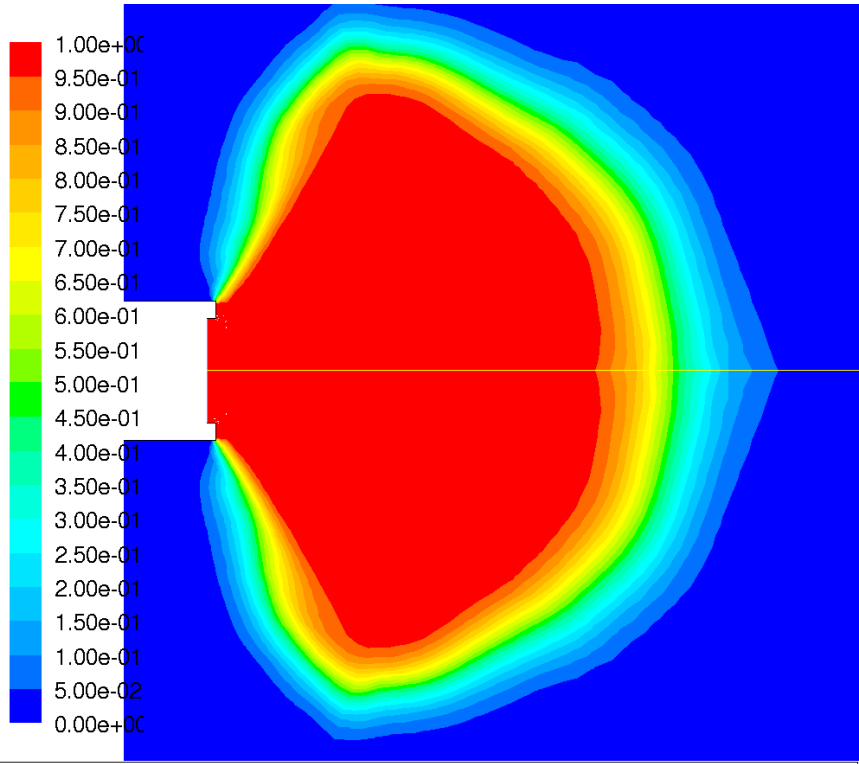
Contours of Mass fraction of propellant (Time=9.3563e-05) Sep 11, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



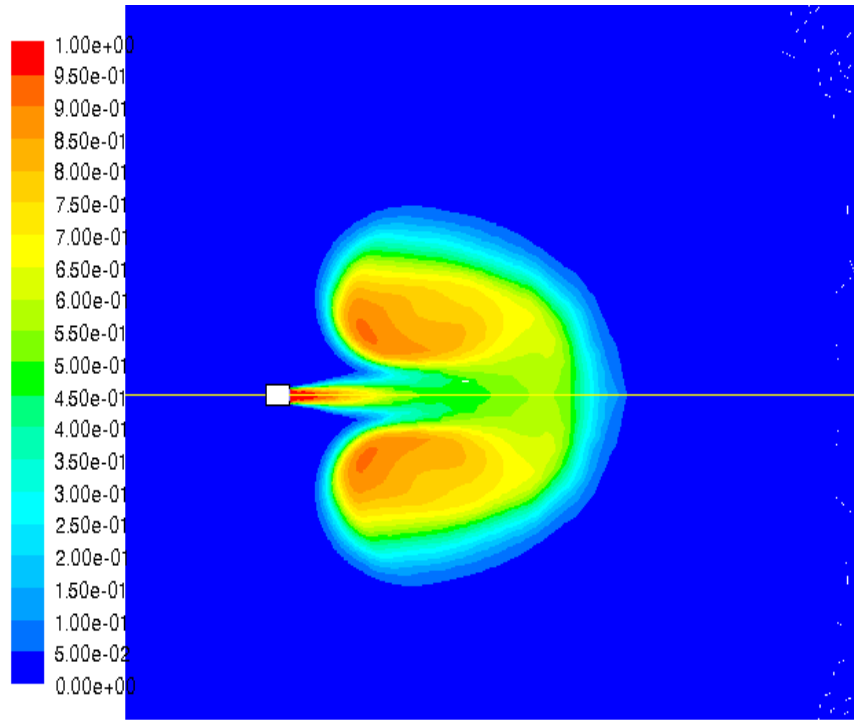
Contours of Mass fraction of propellant (Time=1.7631e-04) Sep 11, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



Contours of Mass fraction of propellant (Time=3.5101e-04) Sep 11, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

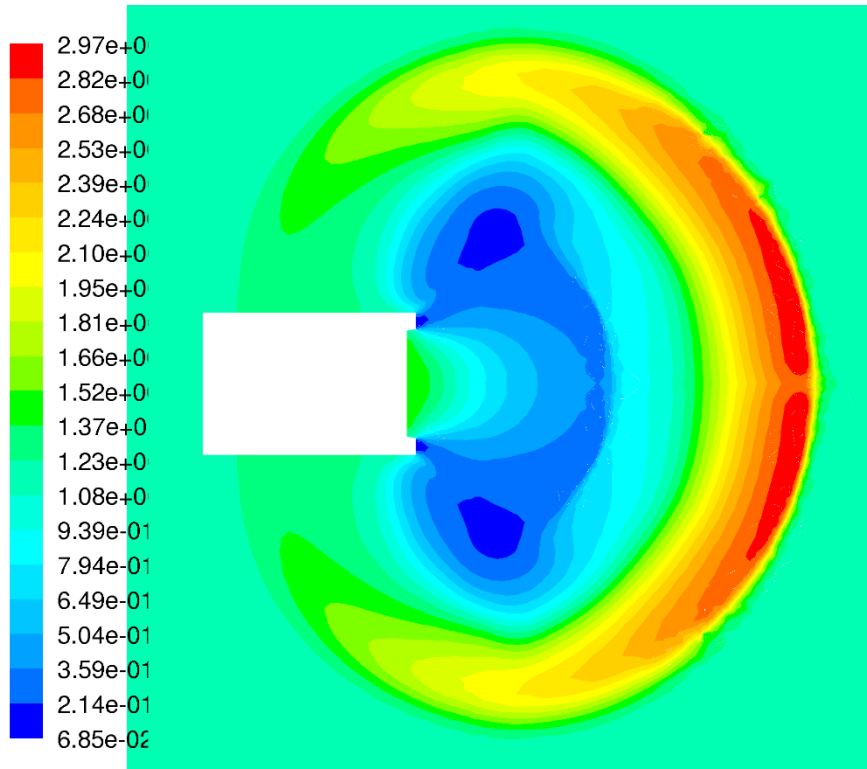


Contours of Mass fraction of propellant (Time=5.8779e-04) Sep 11, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

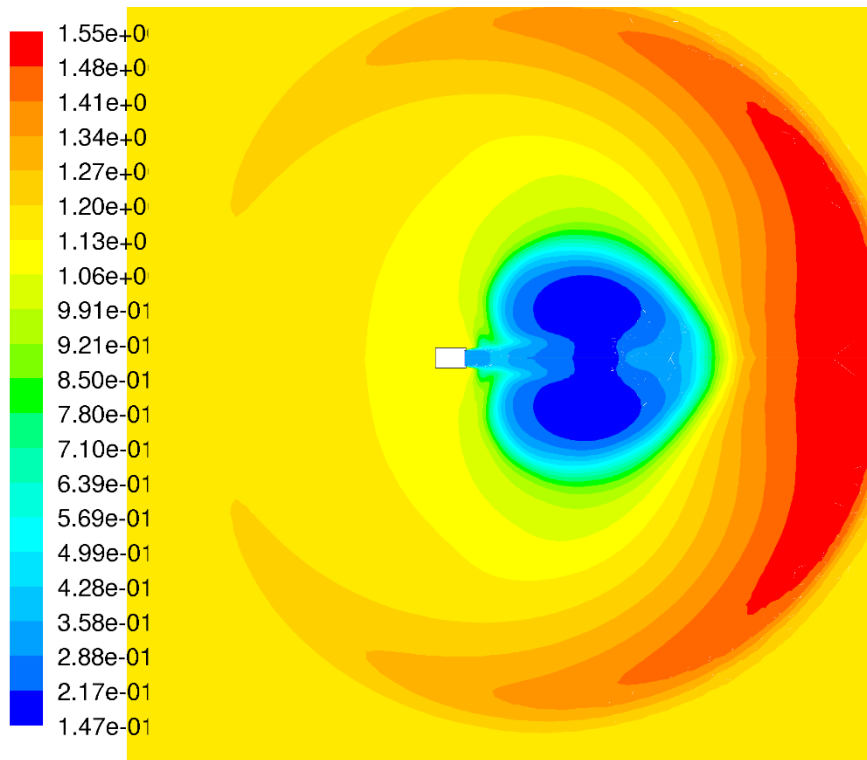


Contours of Mass fraction of propellant (Time=1.0800e-02) May 17, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

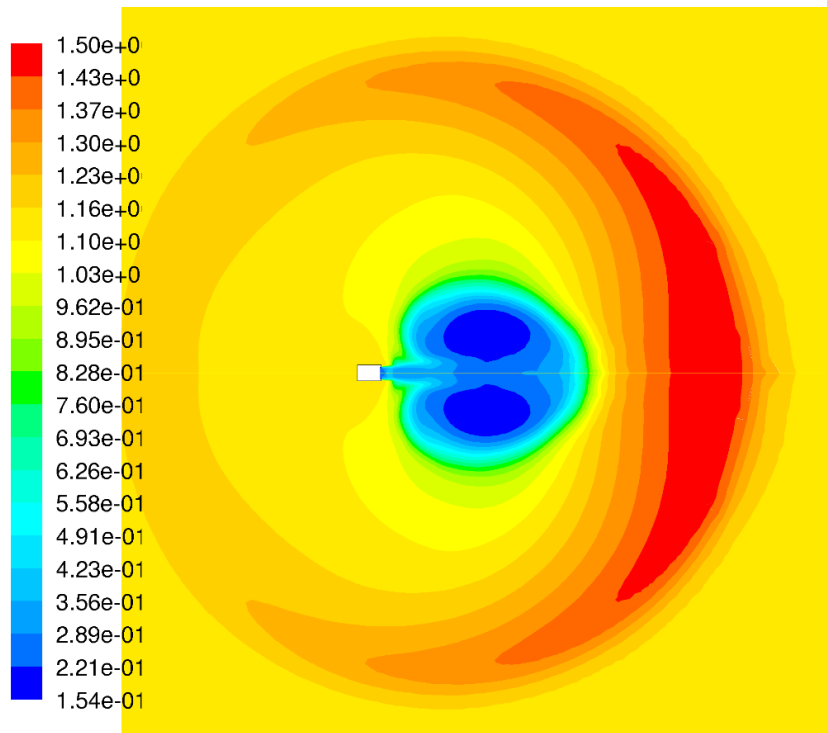
Прилог 1.5 – Дивергентни млазник – Промена густинене гаса током истицања



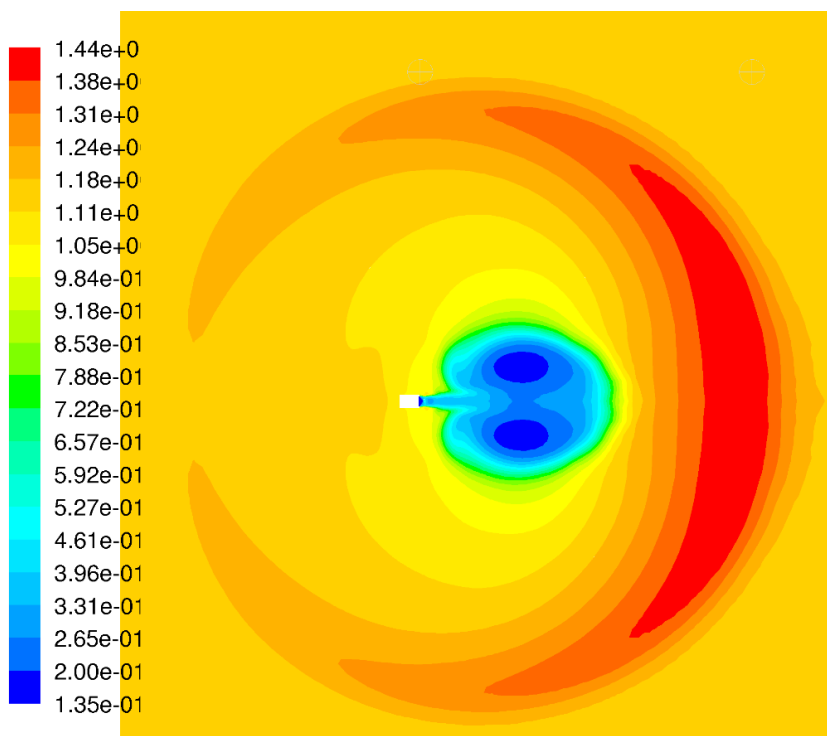
Contours of Density (kg/m3) (Time=5.2973e-04) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



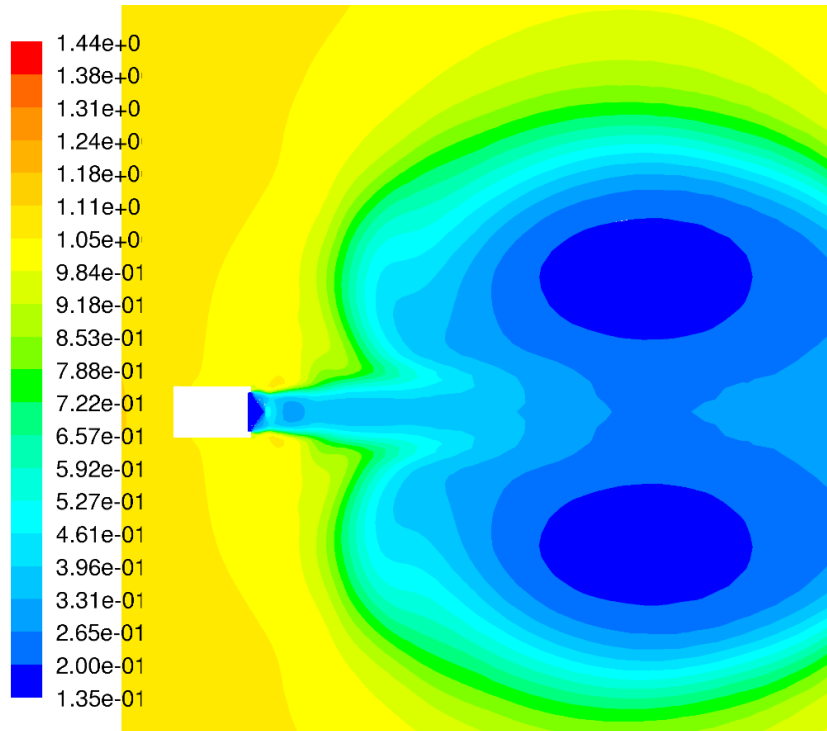
Contours of Density (kg/m3) (Time=6.0002e-03) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



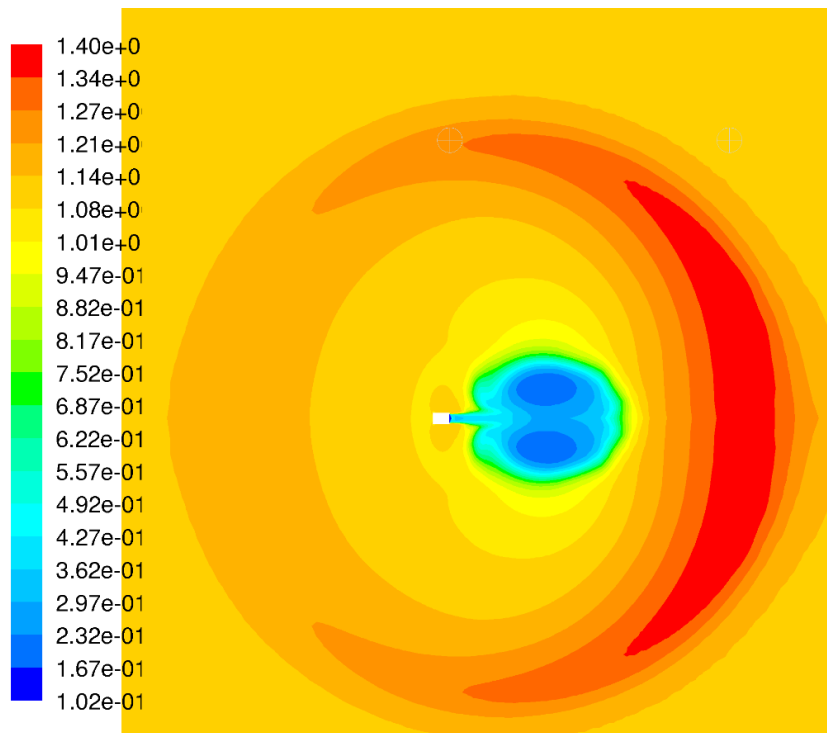
Contours of Density (kg/m3) (Time=7.0001e-03) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



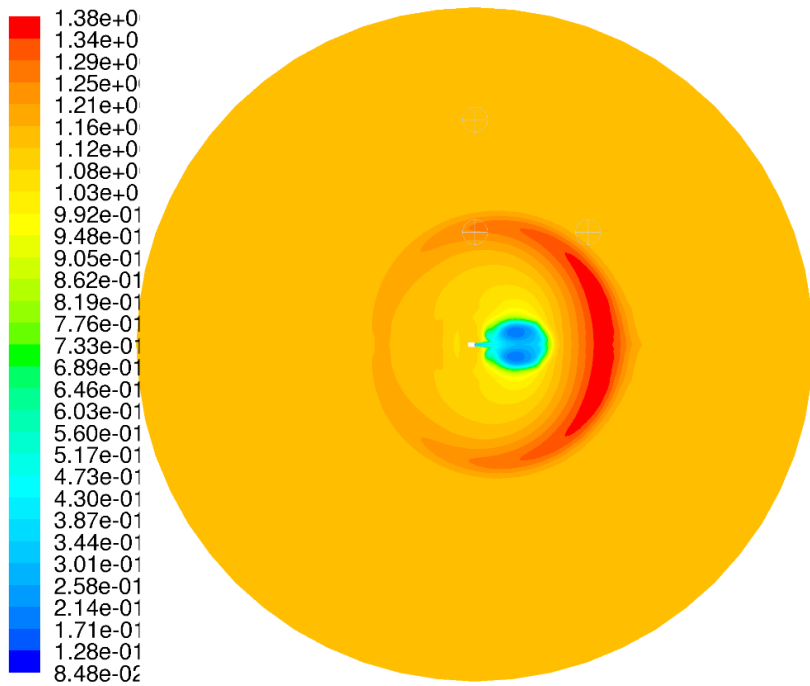
Contours of Density (kg/m3) (Time=8.3703e-03) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



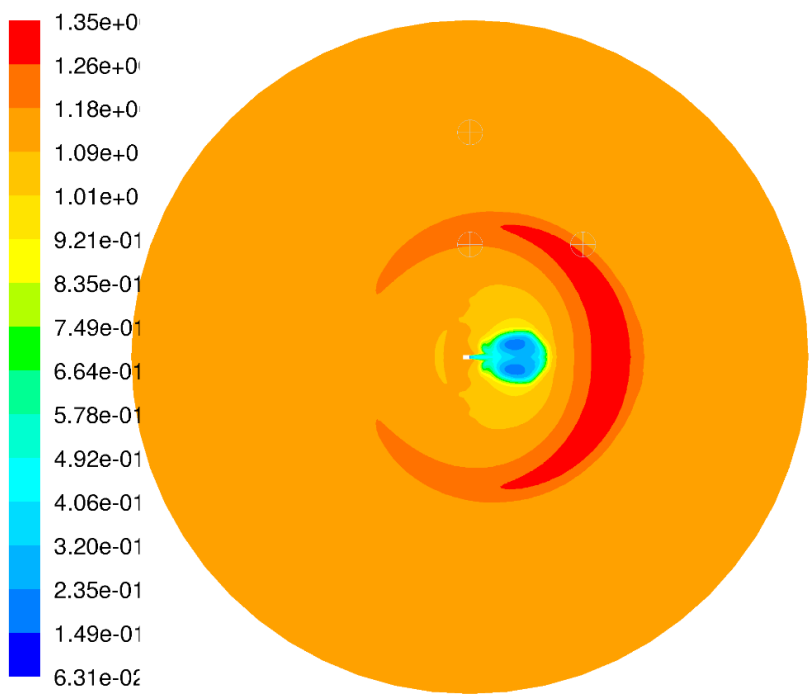
Contours of Density (kg/m3) (Time=8.3703e-03) Aug 29, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



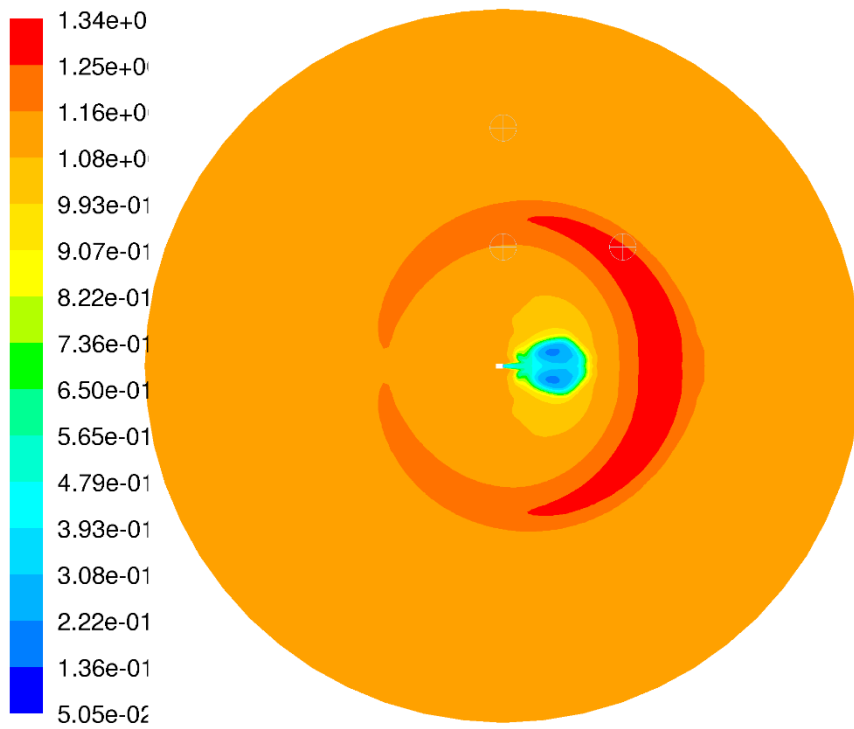
Contours of Density (kg/m3) (Time=9.5000e-03) Aug 29, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



Contours of Density (kg/m3) (Time=1.0250e-02) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

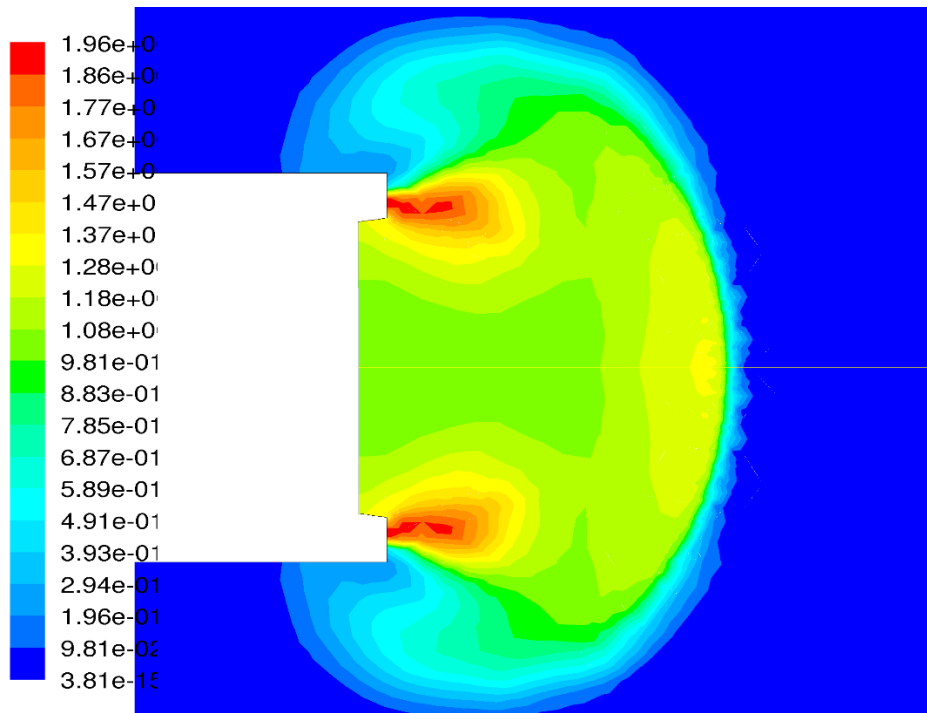


Contours of Density (kg/m3) (Time=1.1500e-02) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

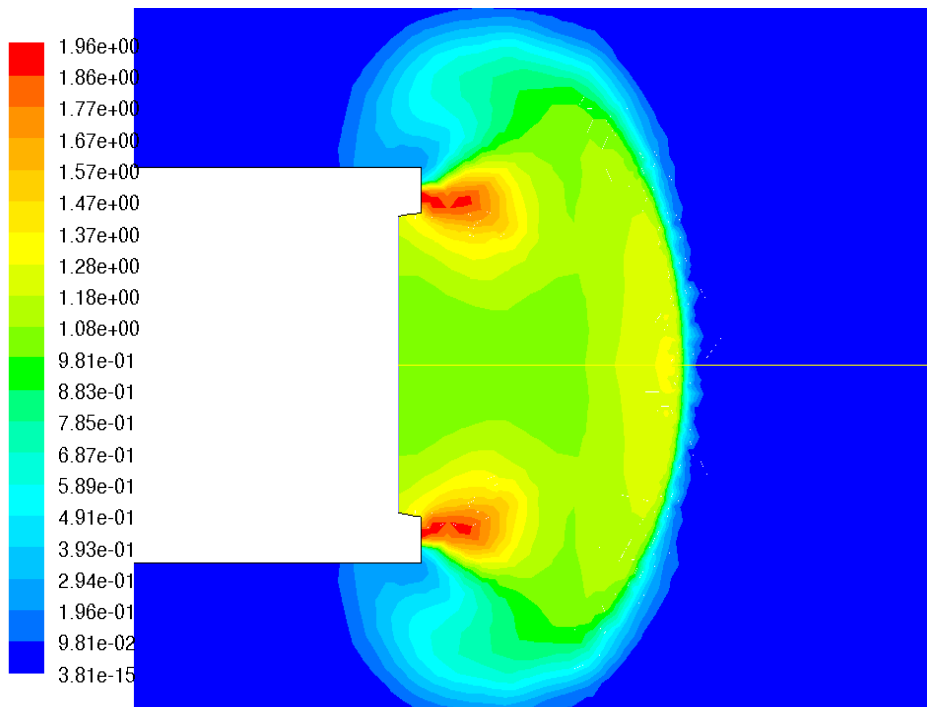


Contours of Density (kg/m3) (Time=1.2252e-02) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

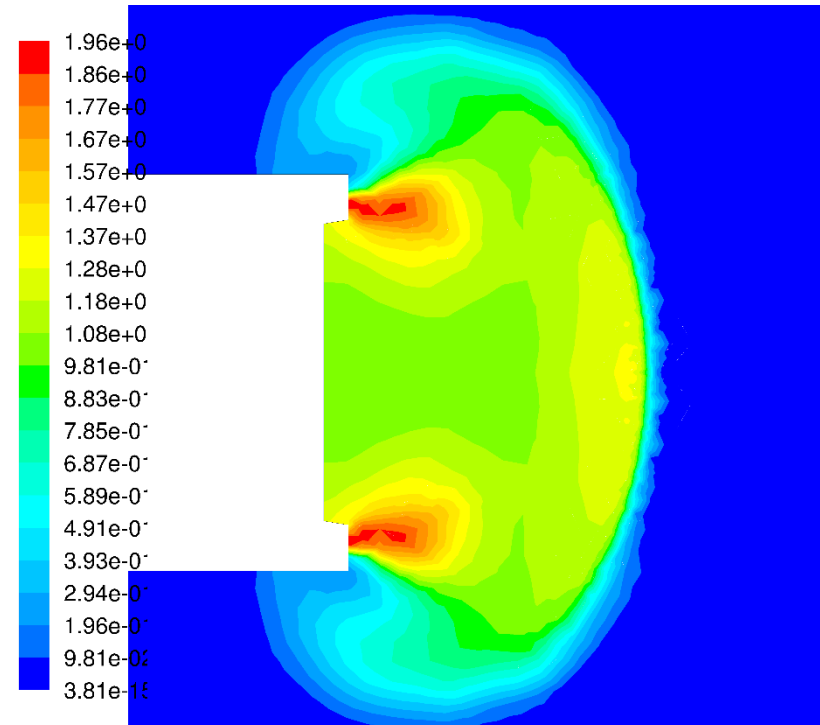
*Прилог 1.6 - Дивергентни млазник – Промена Маховог броја струје гаса
током истицања*



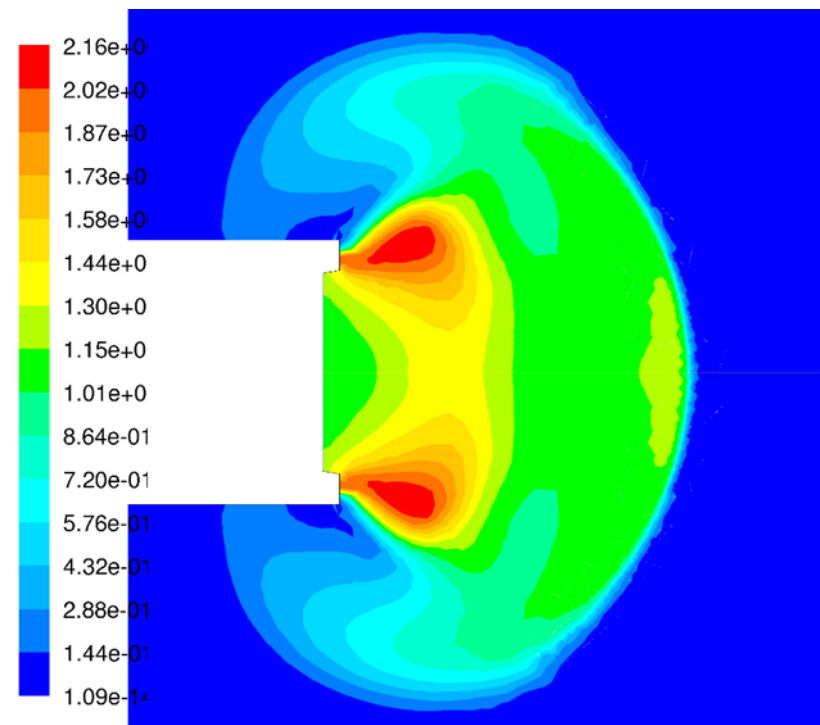
Contours of Mach Number (Time=1.2422e-04) Aug 27, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



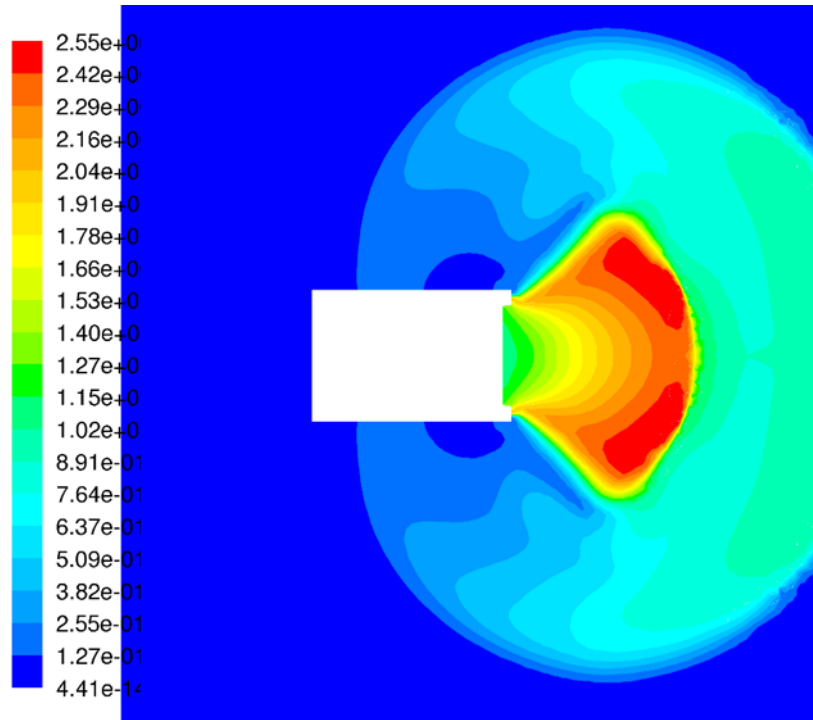
Contours of Mach Number (Time=1.2422e-04) Aug 27, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



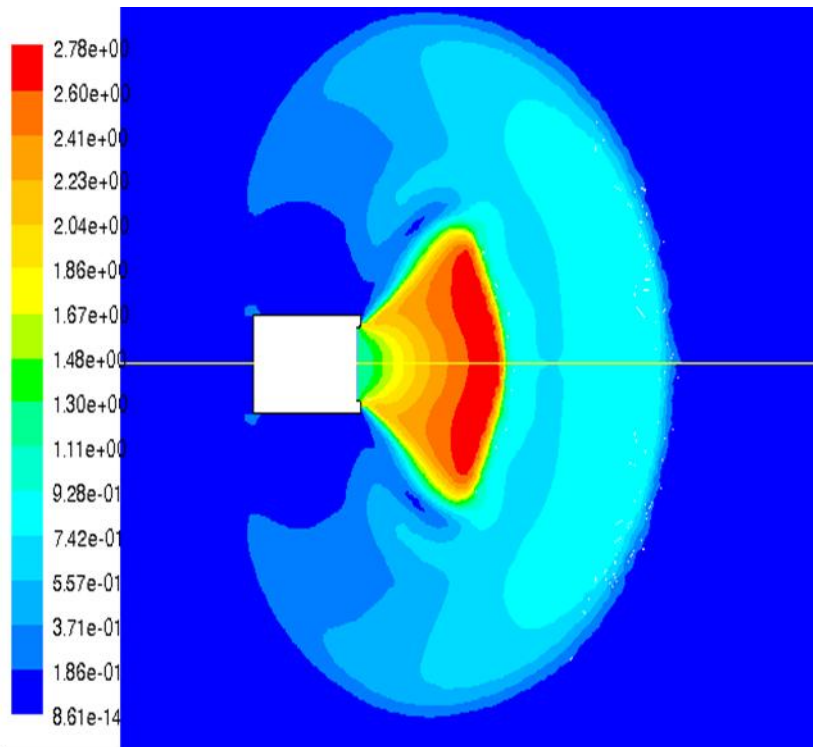
Contours of Mach Number (Time=1.2422e-04) Aug 27, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



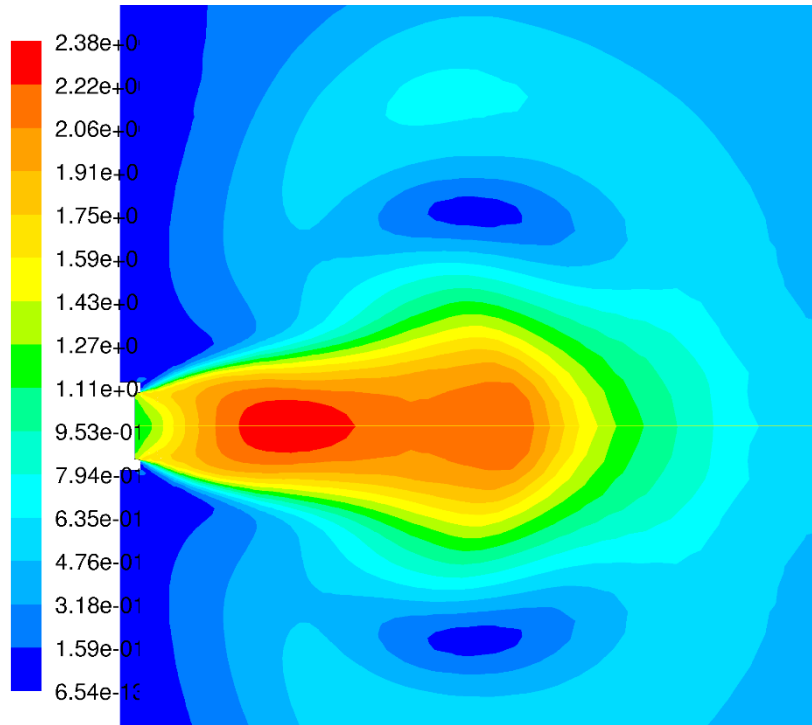
Contours of Mach Number (Time=2.2293e-04) Aug 27, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



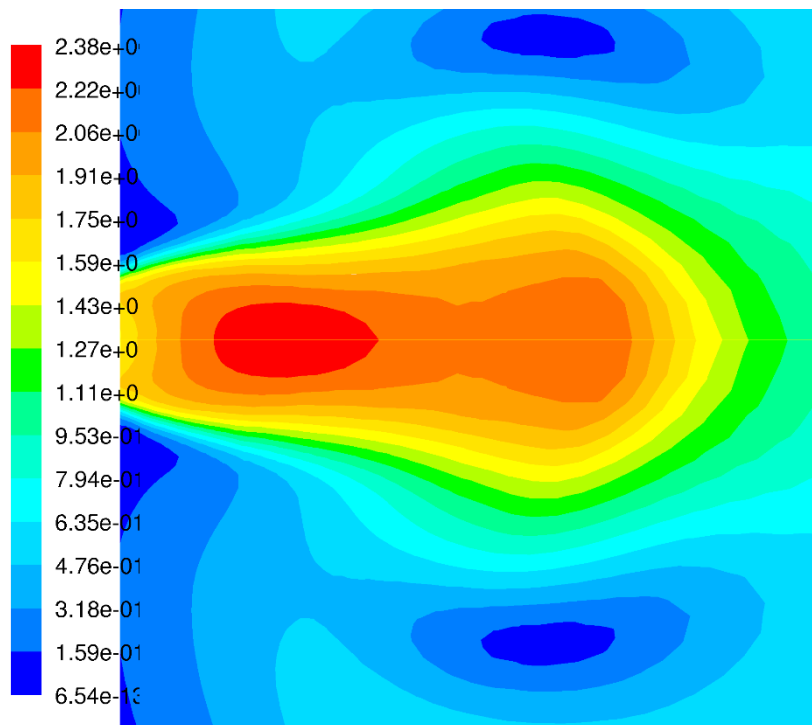
Contours of Mach Number (Time=5.2973e-04) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



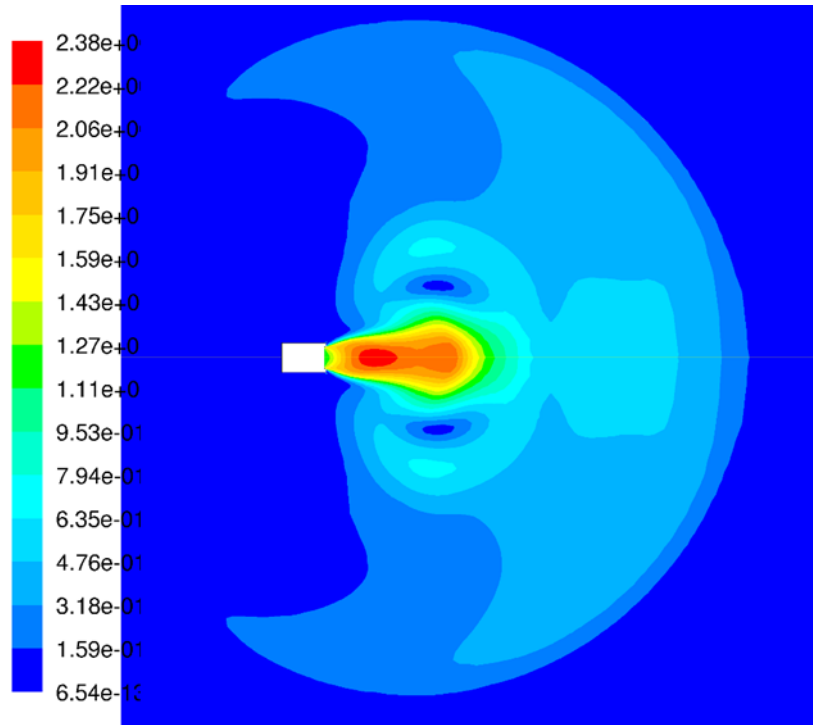
Contours of Mach Number (Time=8.6784e-04) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



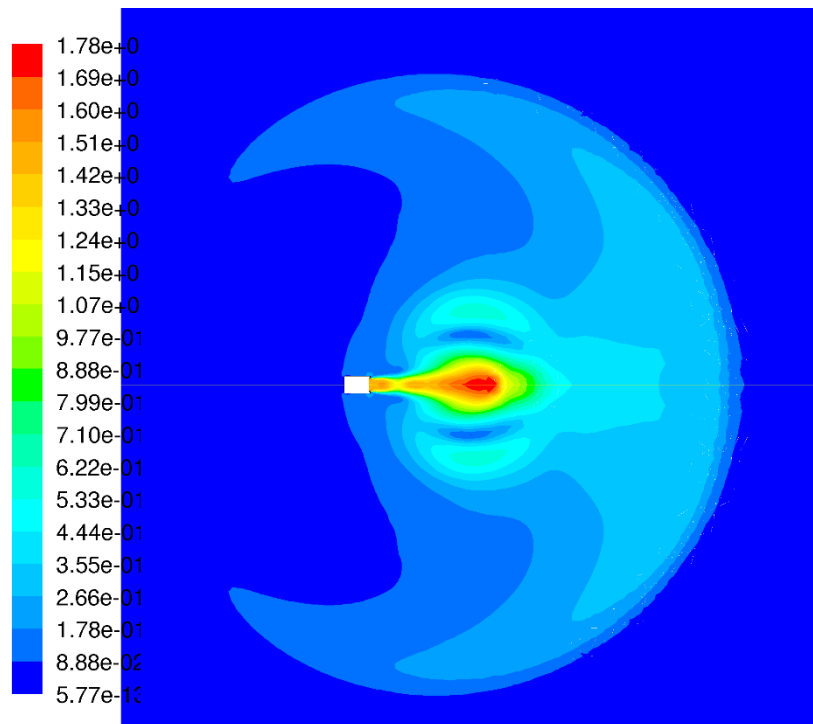
Contours of Mach Number (Time=3.6039e-03) Aug 27, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



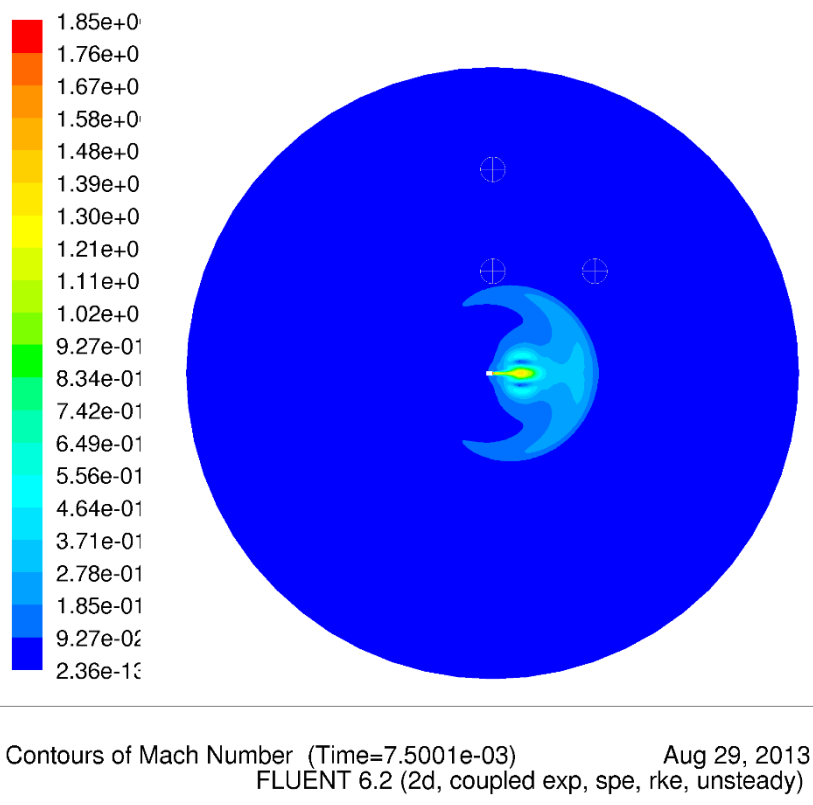
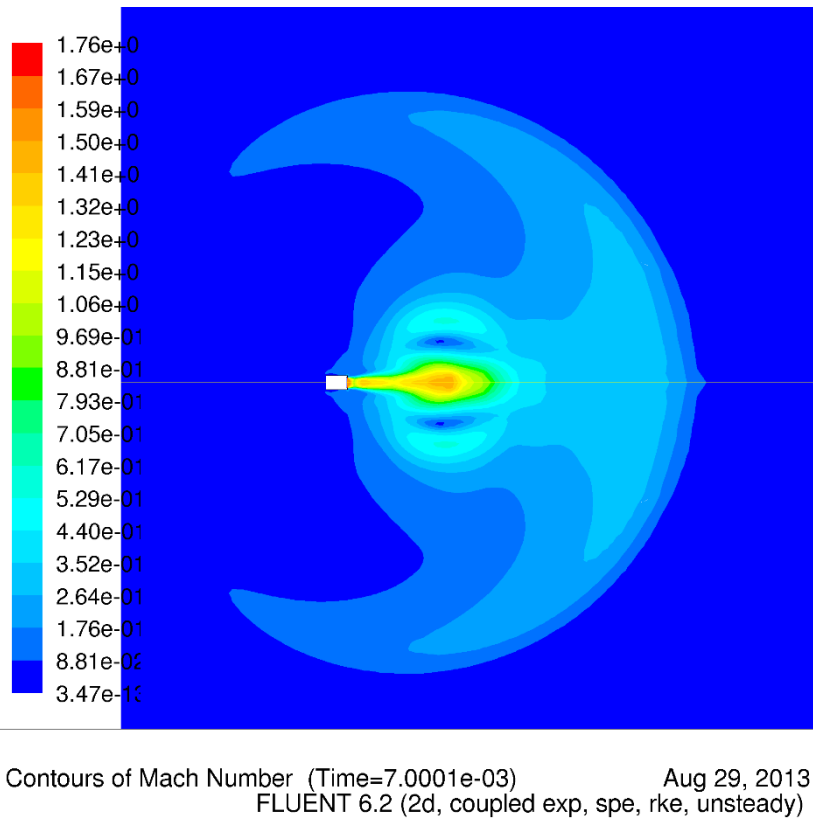
Contours of Mach Number (Time=3.6039e-03) Aug 27, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

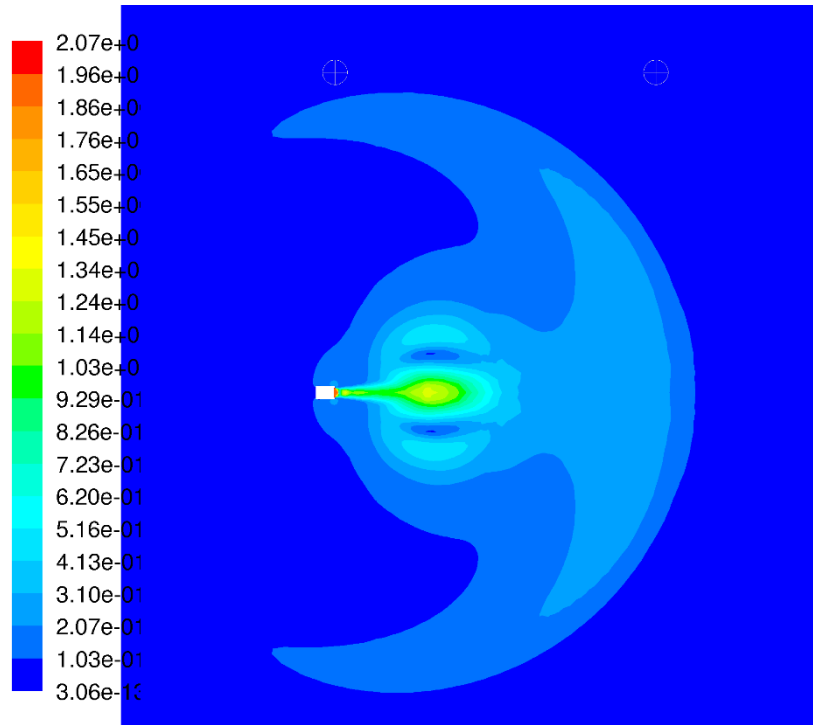


Contours of Mach Number (Time=3.6039e-03) Aug 27, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

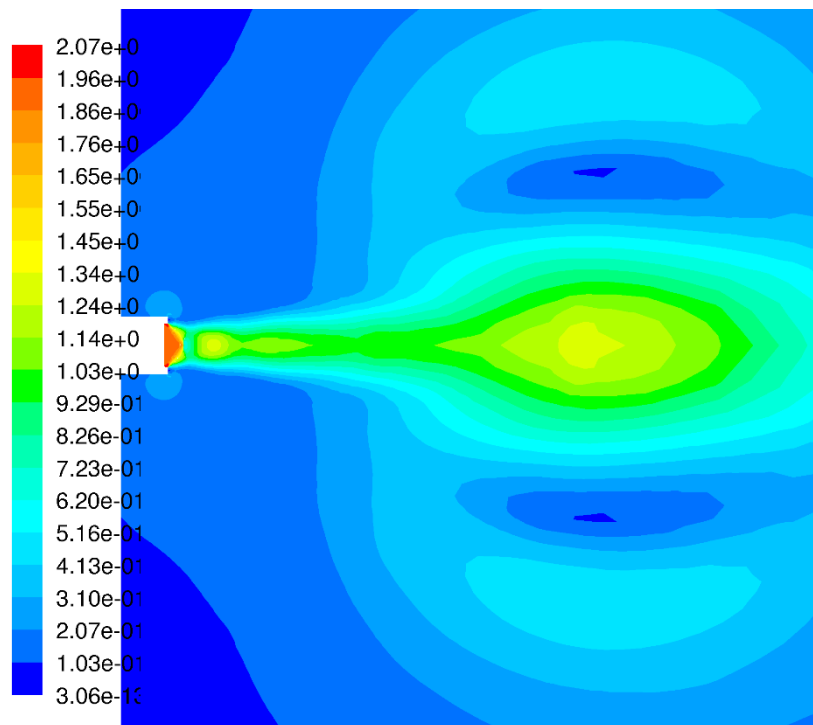


Contours of Mach Number (Time=6.0002e-03) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



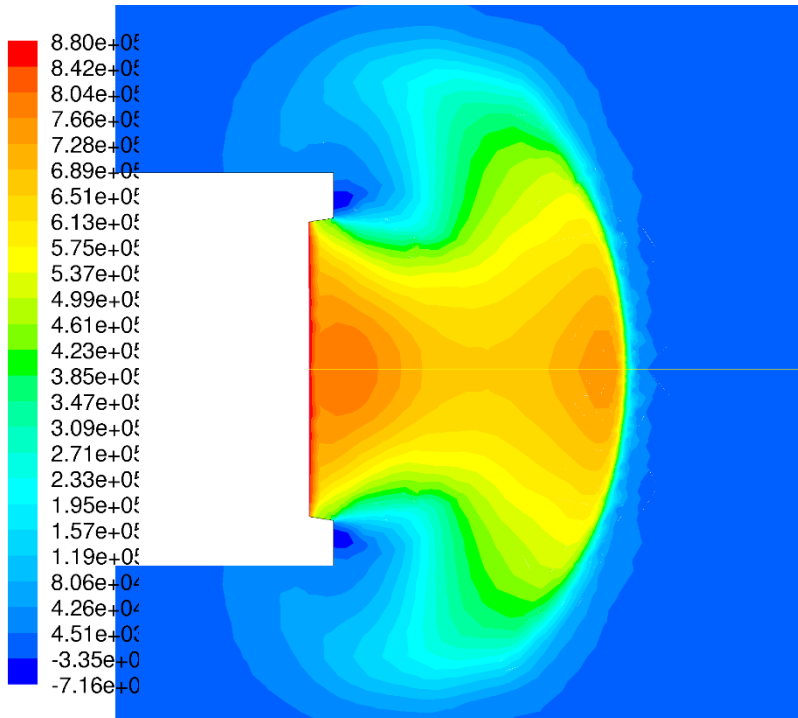


Contours of Mach Number (Time=8.3703e-03) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

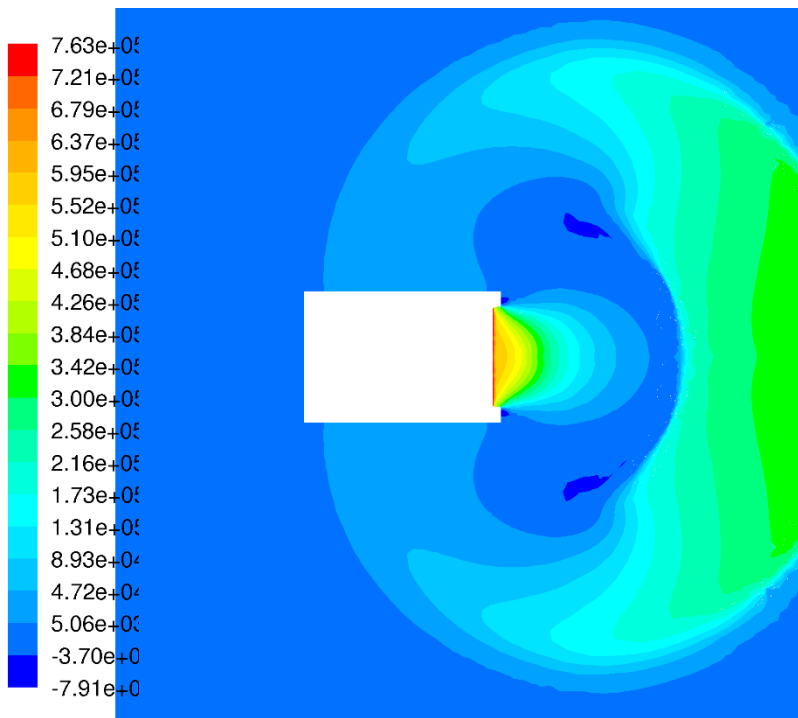


Contours of Mach Number (Time=8.3703e-03) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

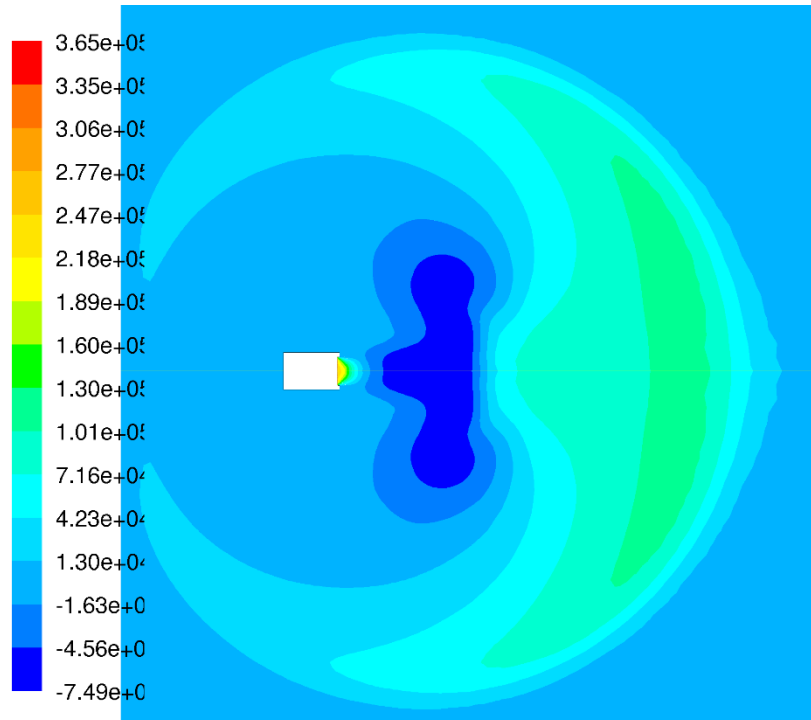
Прилог 1.7 - Дивергентни млазник – Промена притиска гаса током истицања



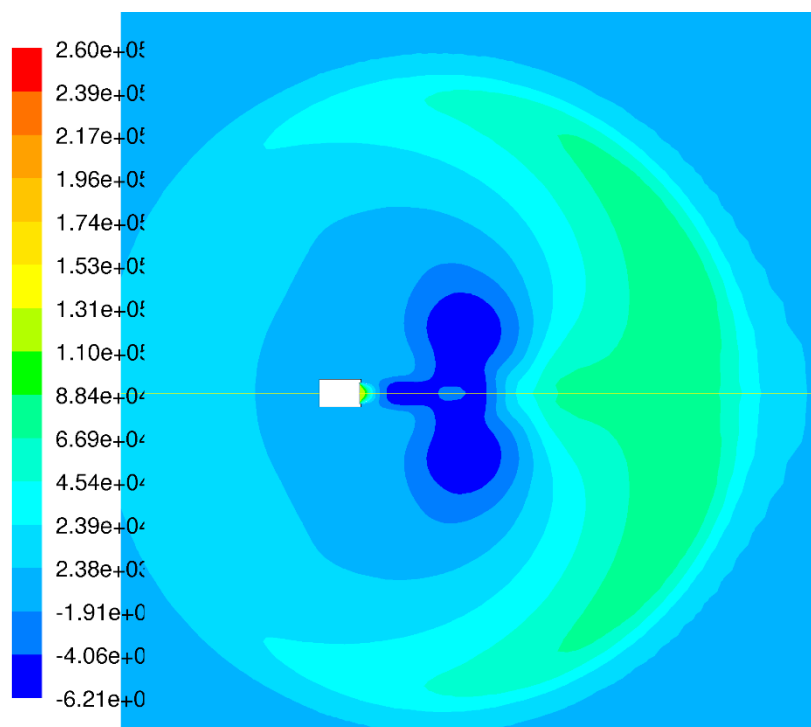
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.2422e-04) Aug 27, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



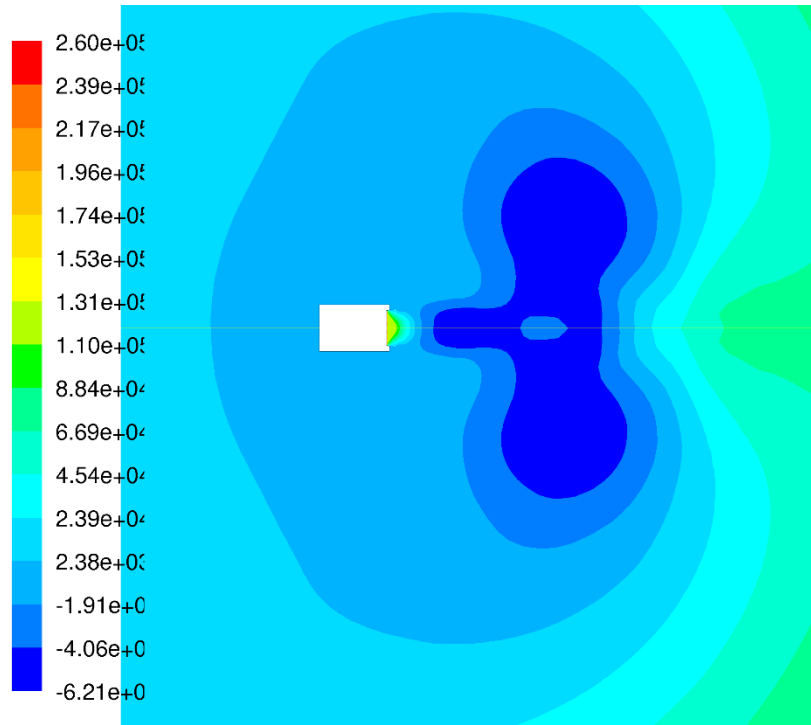
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=5.2973e-04) Aug 29, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



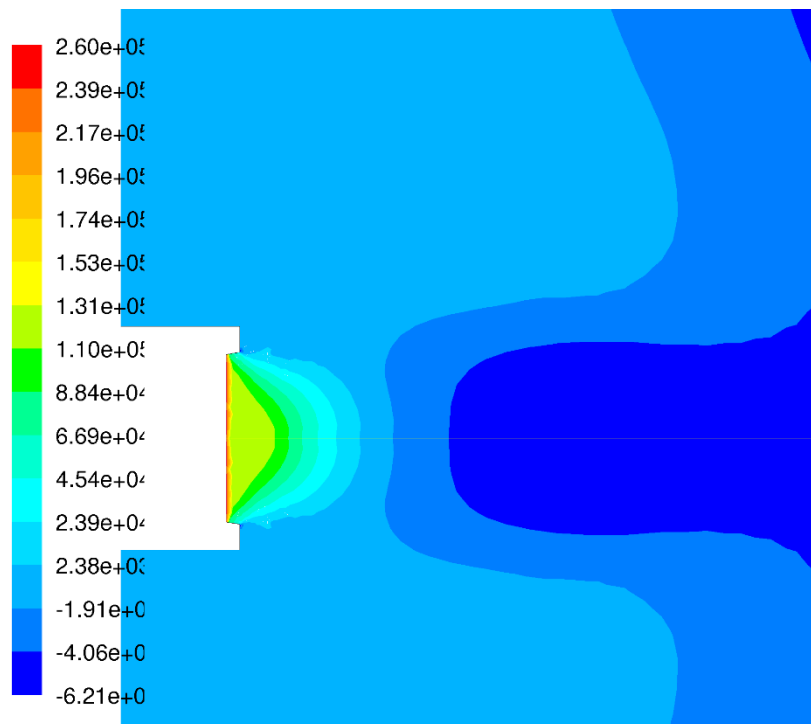
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=2.6377e-03) Aug 27, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



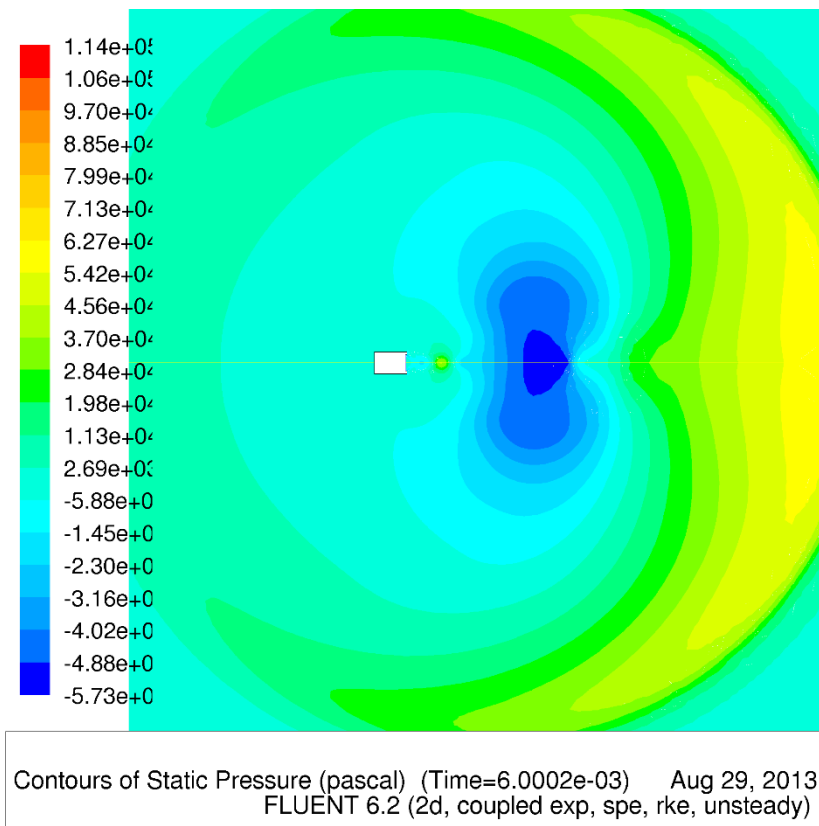
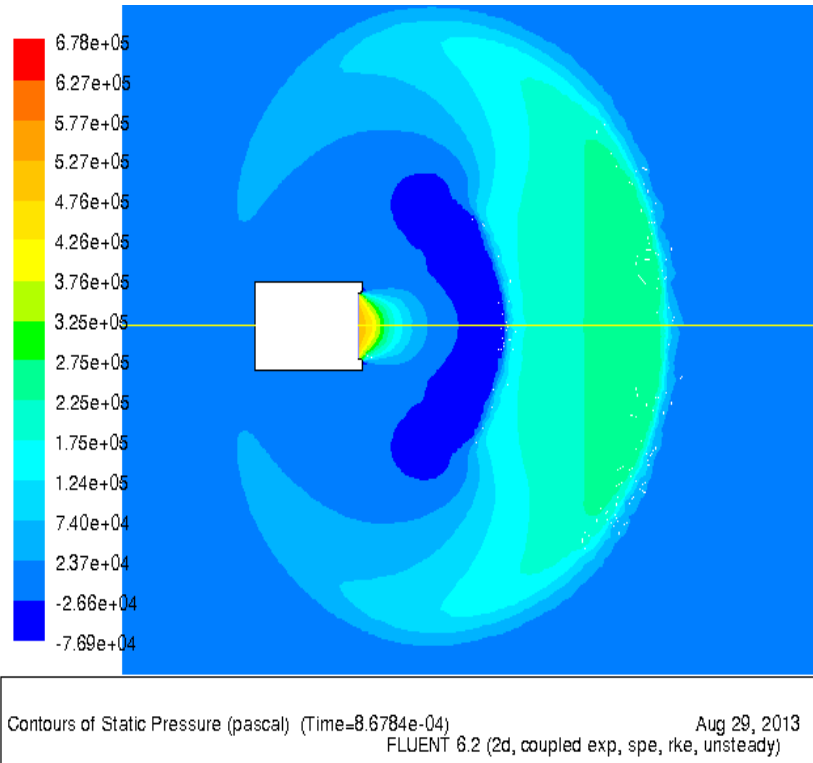
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=3.6039e-03) Aug 27, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

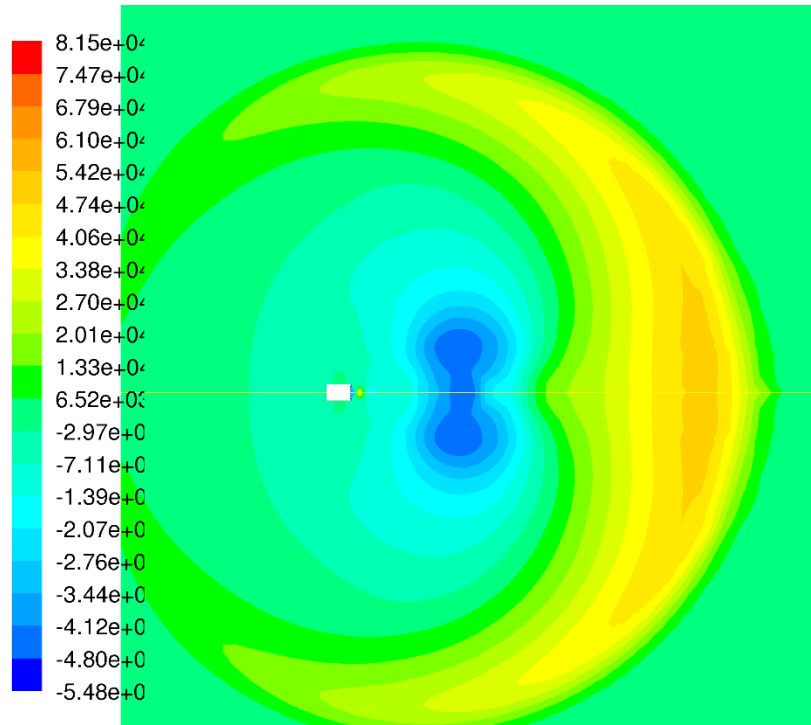


Contours of Static Pressure (pascal) (Time=3.6039e-03) Aug 27, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

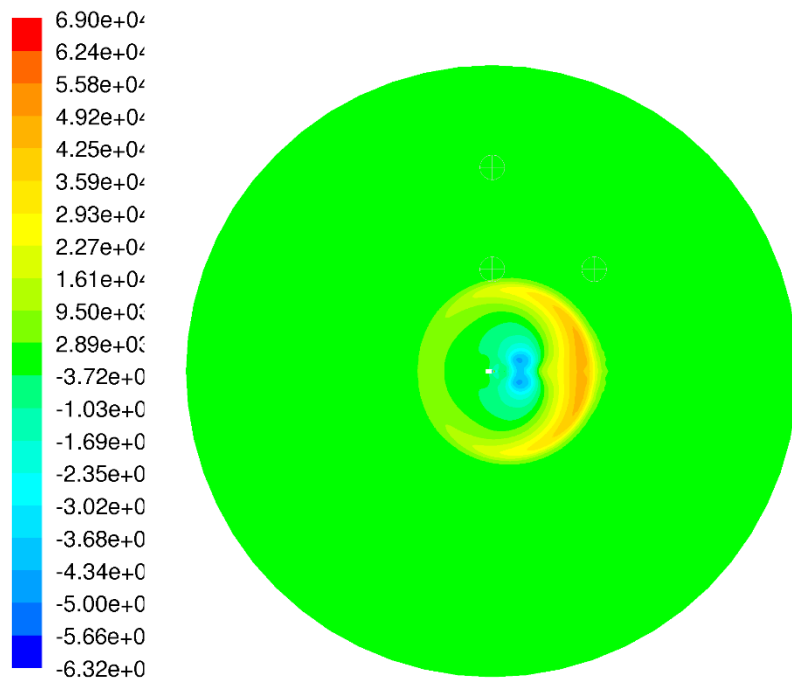


Contours of Static Pressure (pascal) (Time=3.6039e-03) Aug 27, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

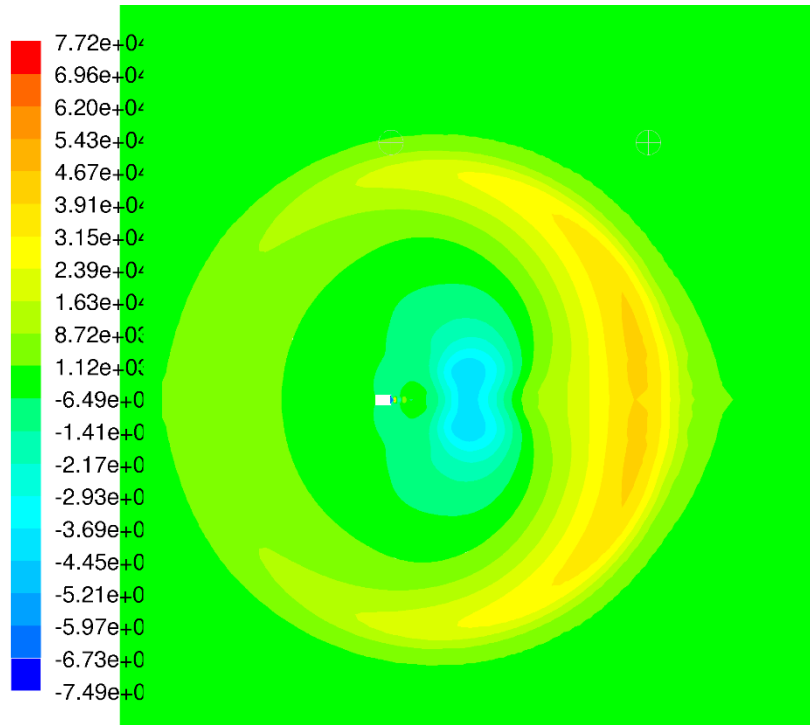




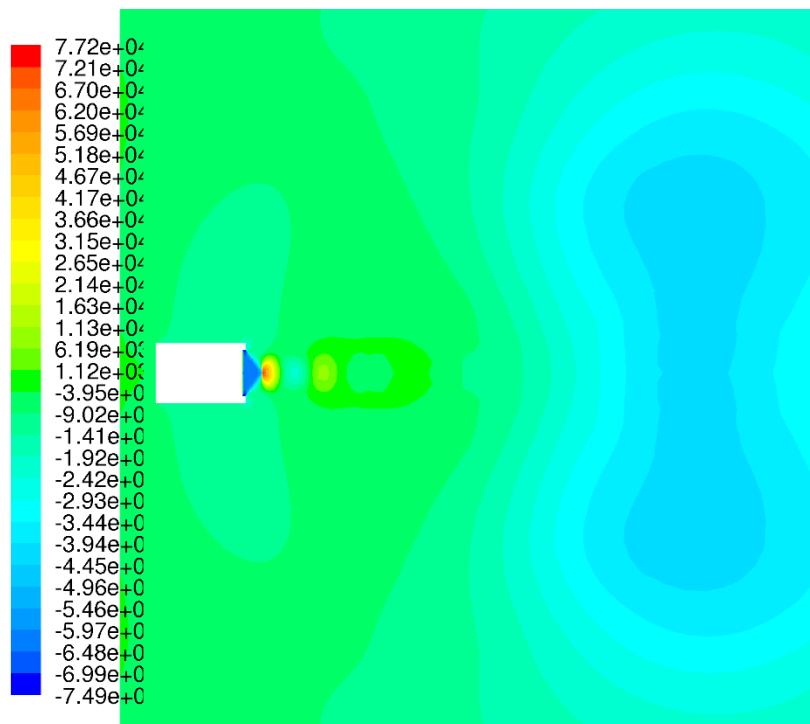
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=7.0001e-03) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



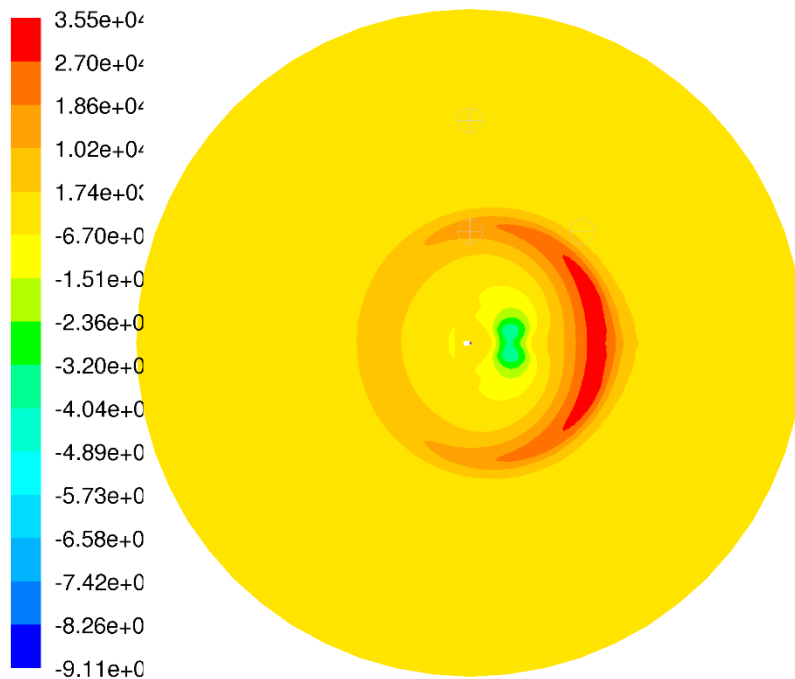
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=7.5001e-03) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



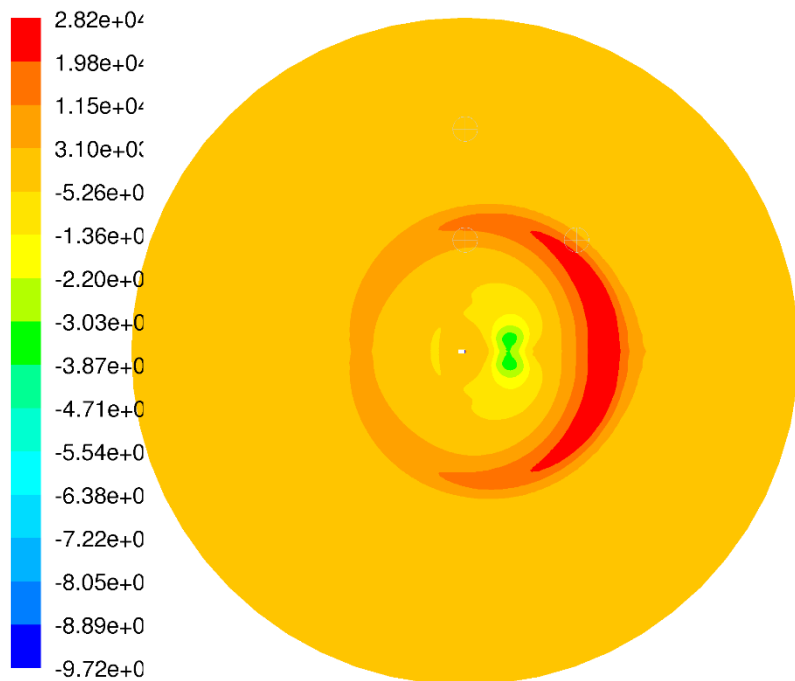
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=8.3703e-03) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



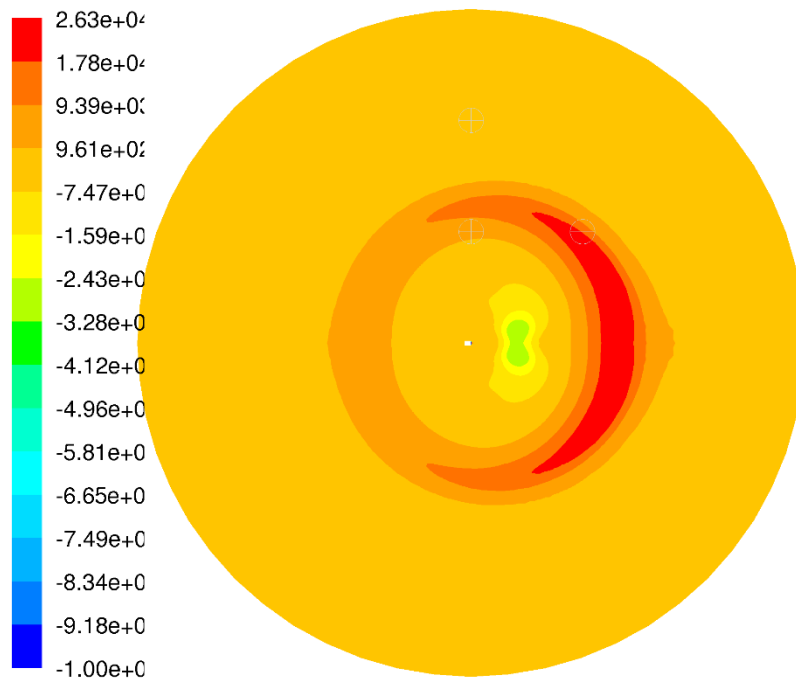
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=8.3703e-03) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.0250e-02) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

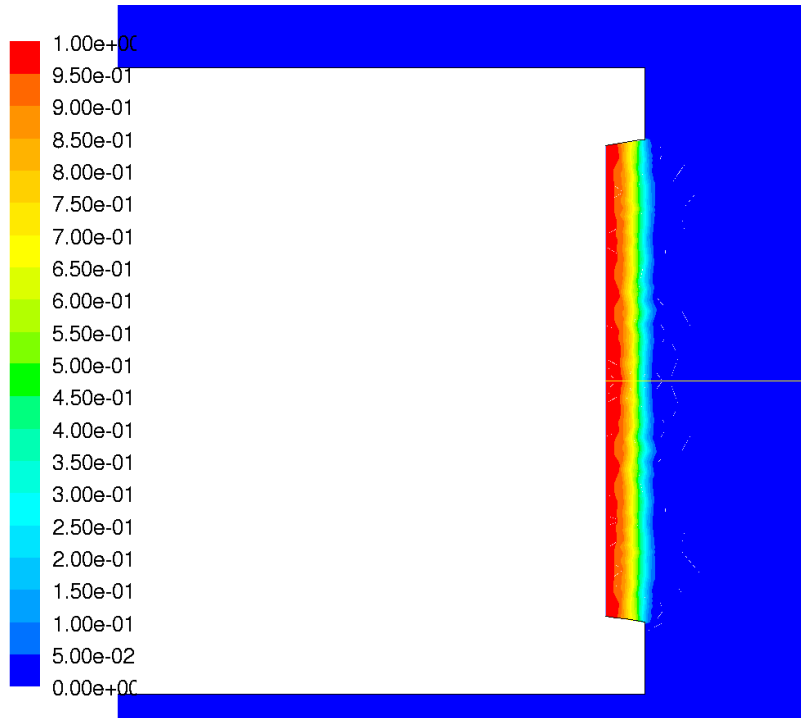


Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.1500e-02) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

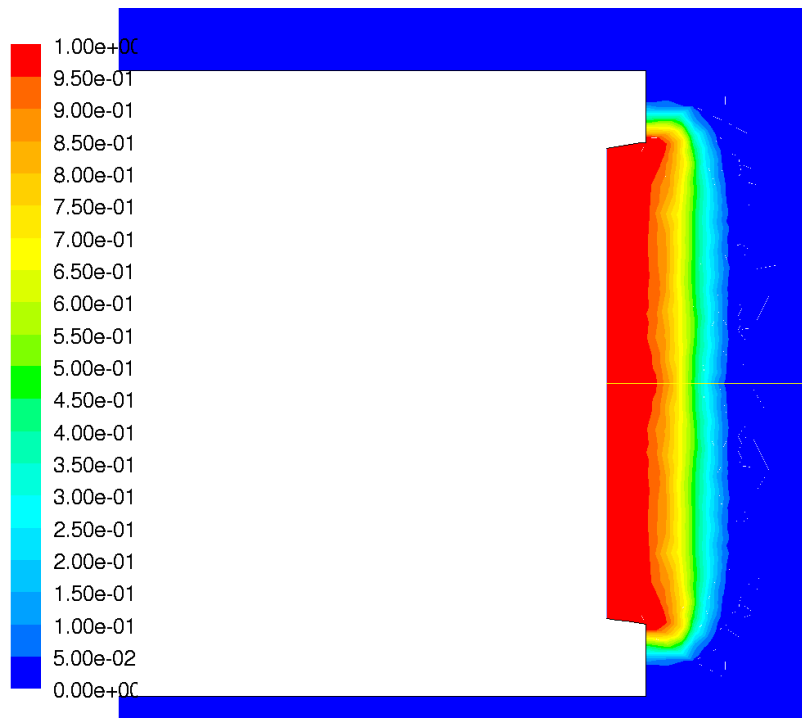


Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.2252e-02) Aug 29, 2013
FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

Прилог 1.8 - Дивергентни млазник – Промена масеног учешћа продуката сагоревања током истицања

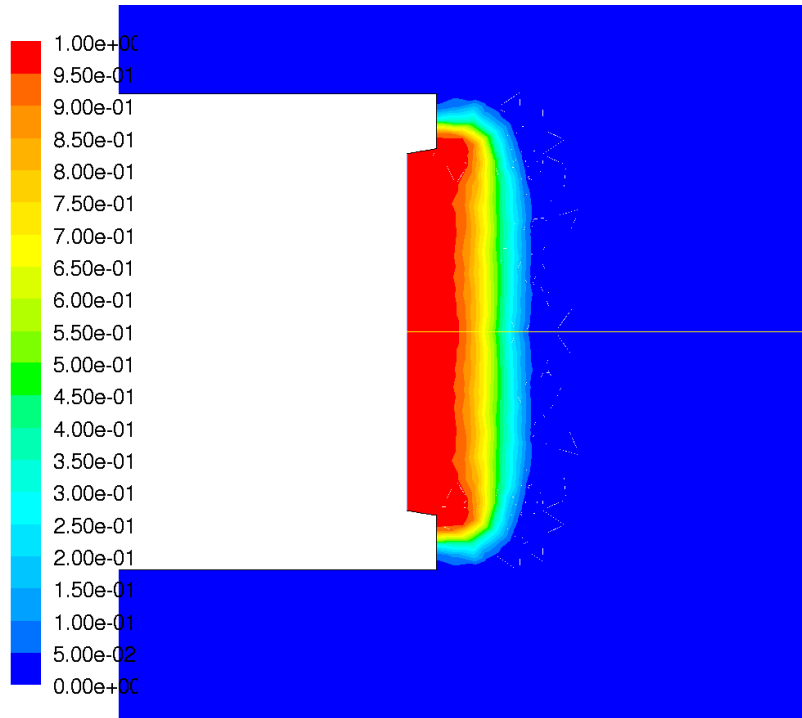


Contours of Mass fraction of propellant (Time=1.1274e-05) Sep 11, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

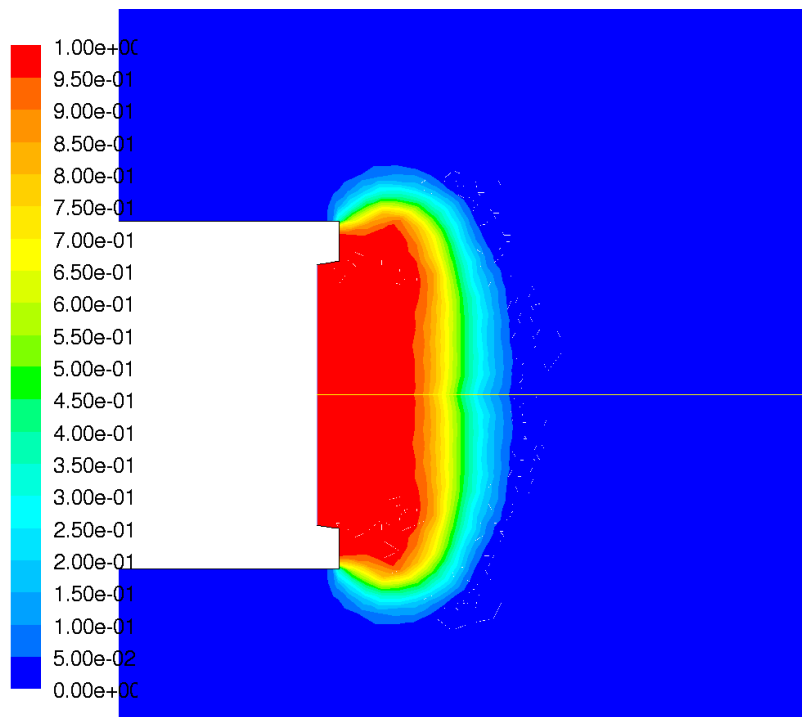


Contours of Mass fraction of propellant (Time=3.0695e-05) Sep 11, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

//



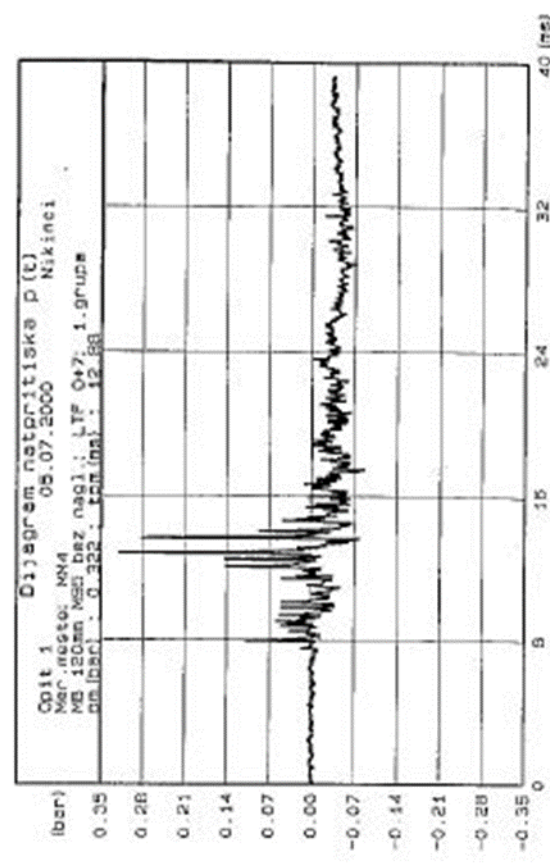
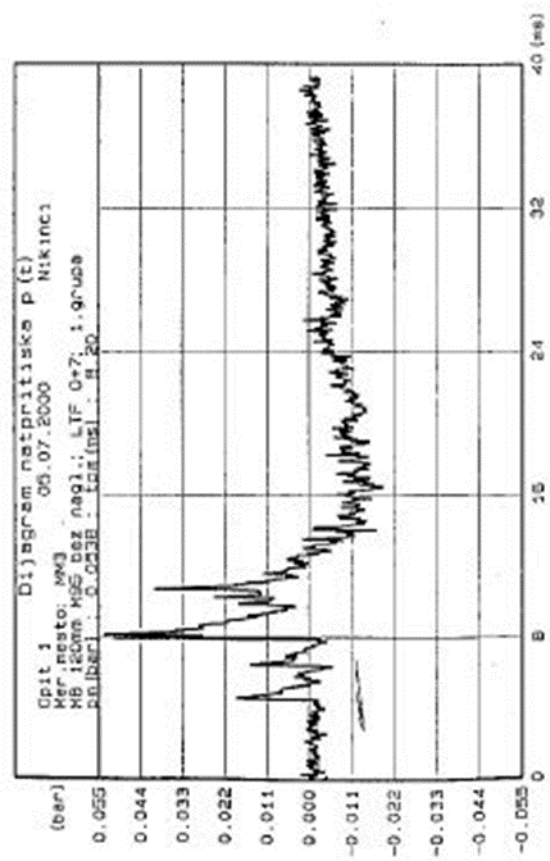
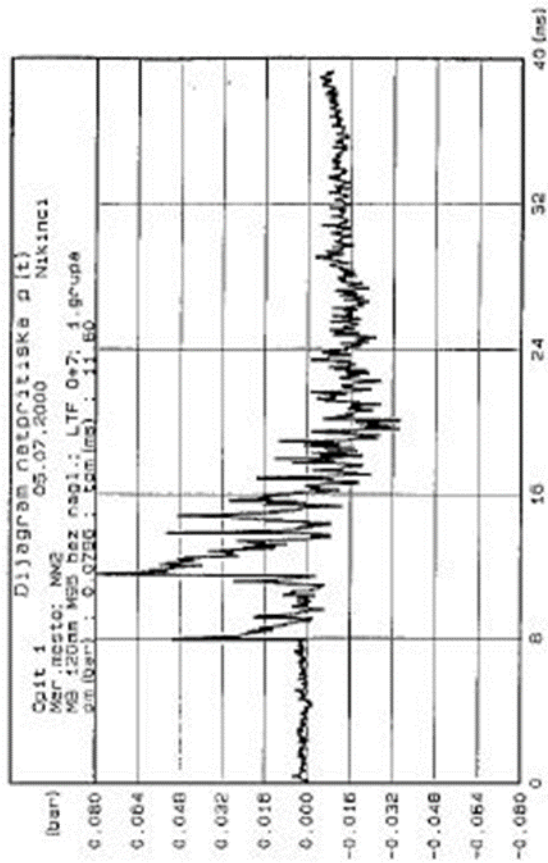
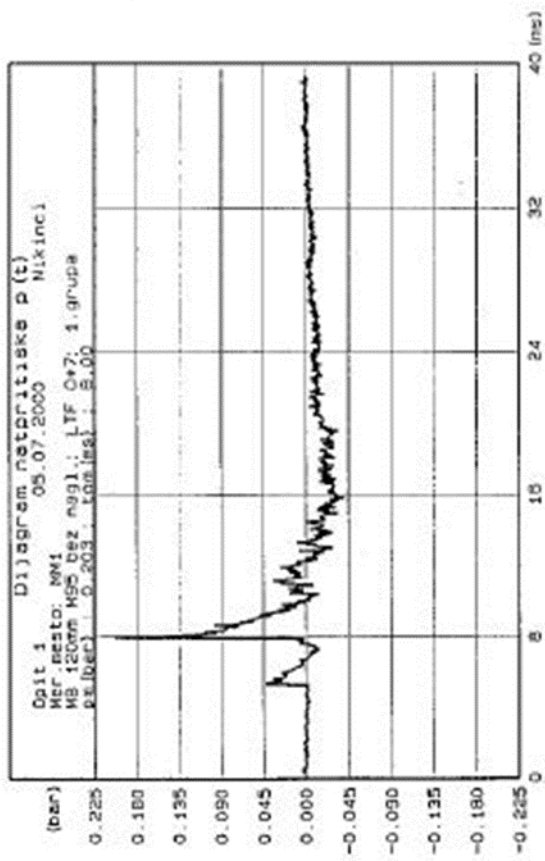
Contours of Mass fraction of propellant (Time=4.2132e-05) Sep 11, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)



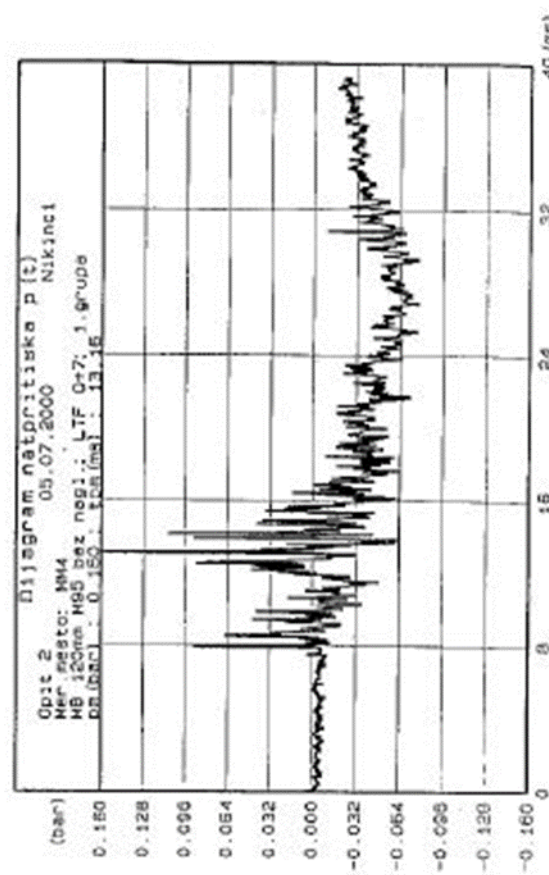
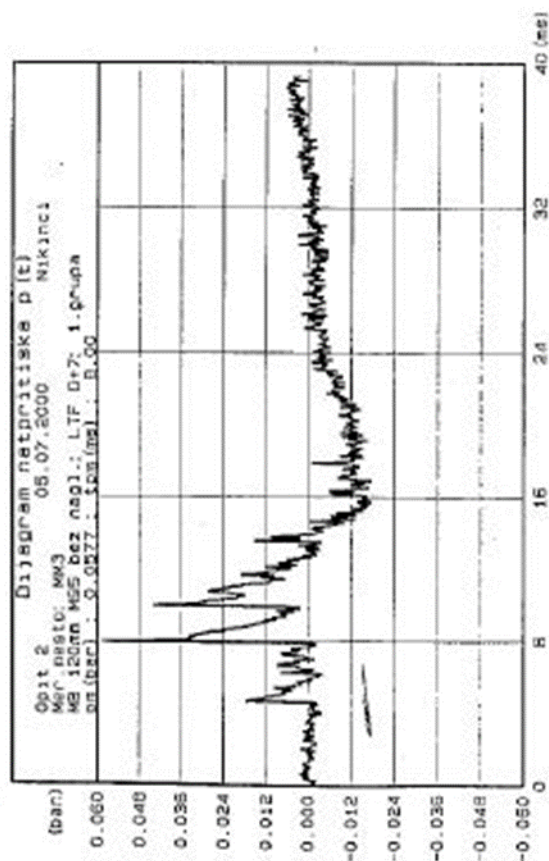
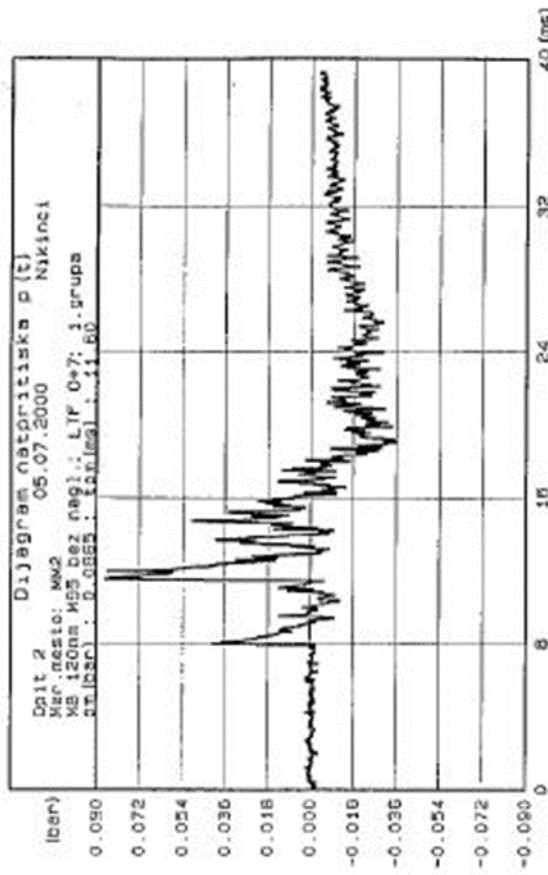
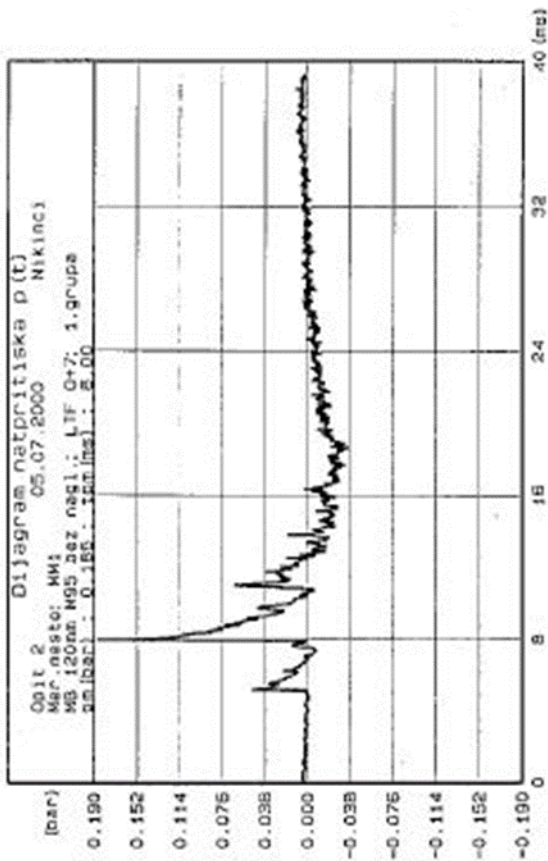
Contours of Mass fraction of propellant (Time=9.3223e-05) Sep 11, 2013
 FLUENT 6.2 (2d, coupled exp, spe, rke, unsteady)

Прилог 2 – Експериментални резултати - графици натпритиска око оруђа

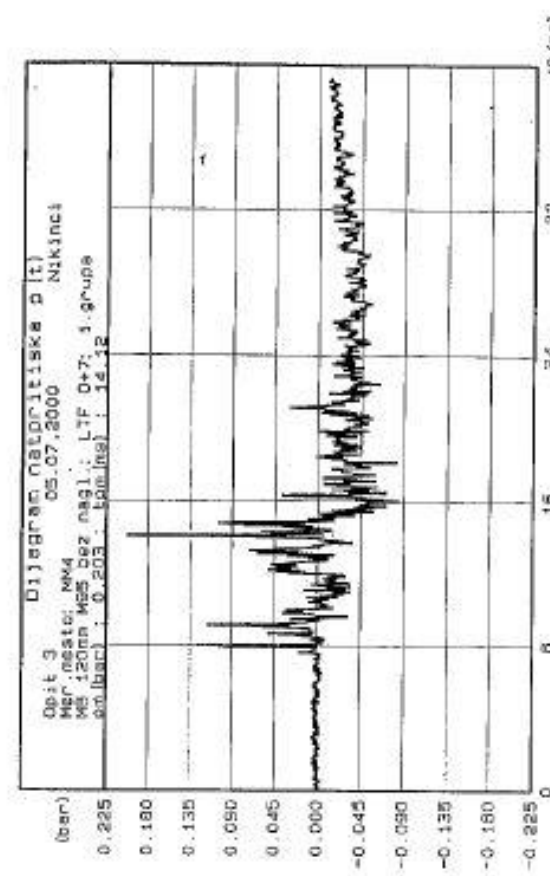
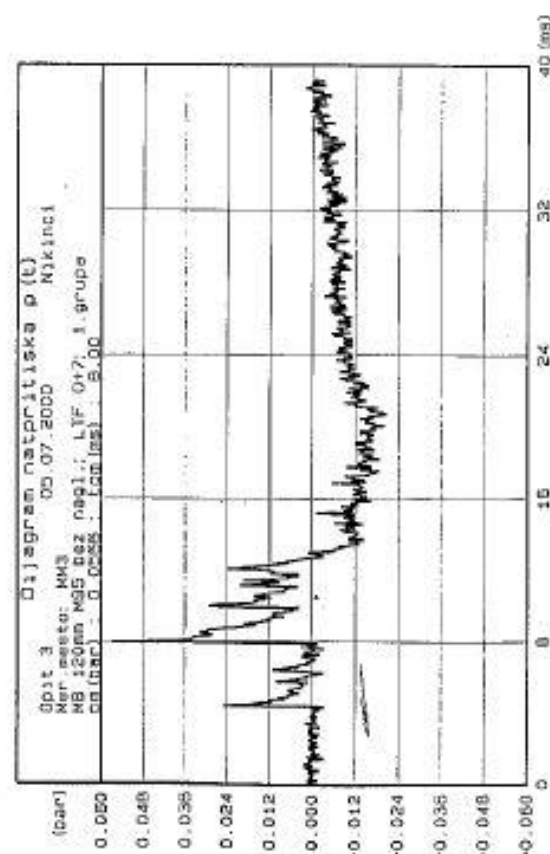
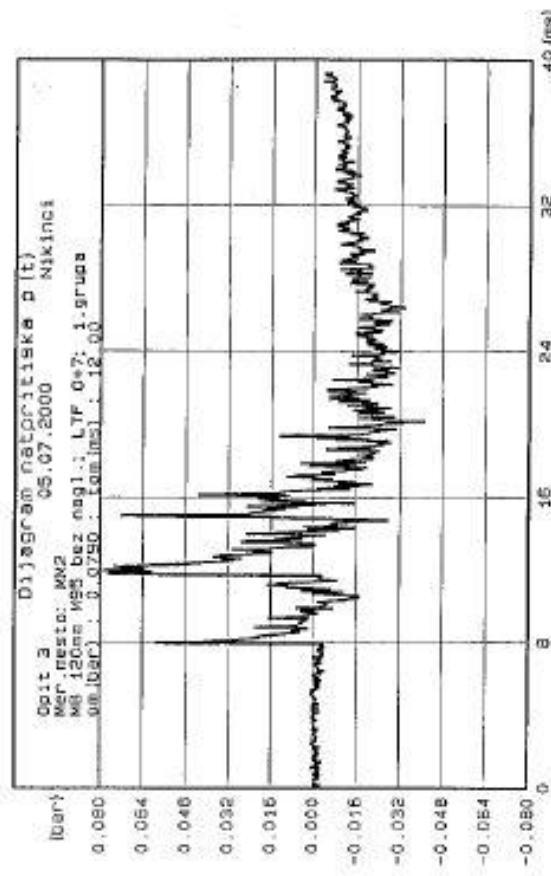
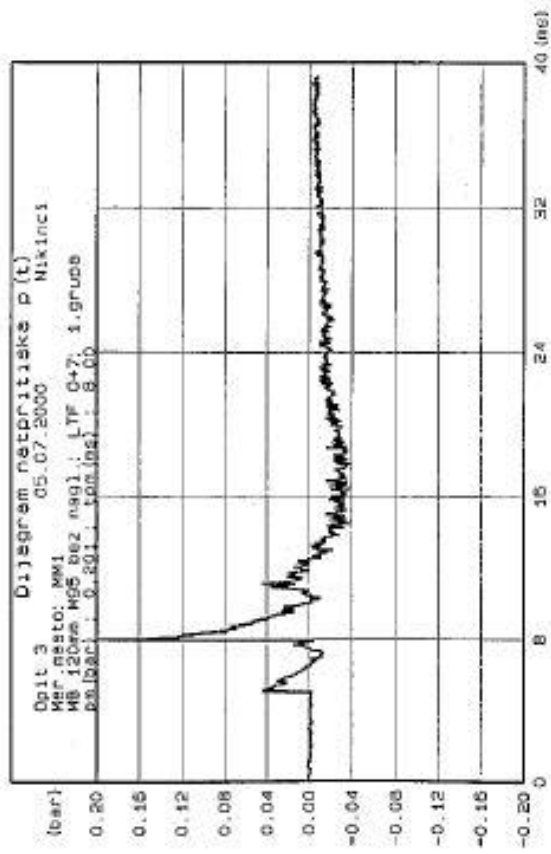
*Прилог 2.1 – Графици натпритиска гађање из МБ 120 мм М95 са мином
120 мм М62П6, (0+7) б/п, варијанта "А"*



Obrada izvršena po programu UT/MRS

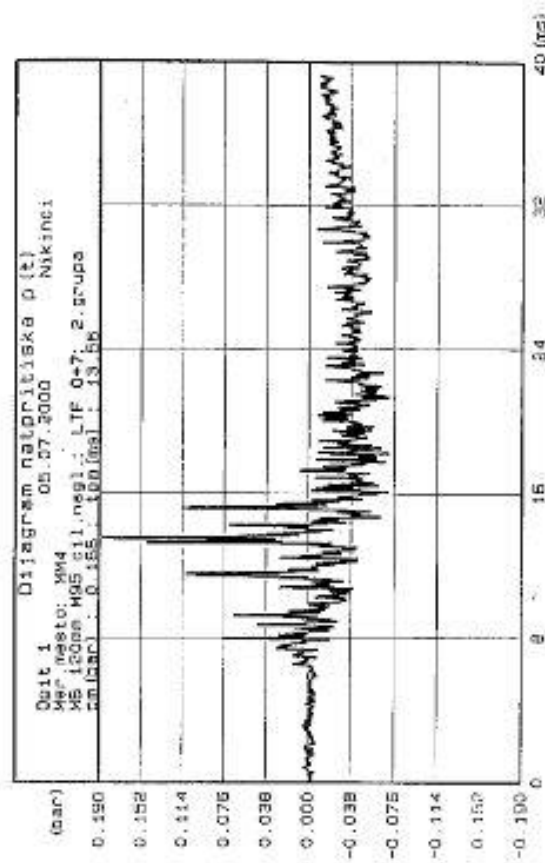
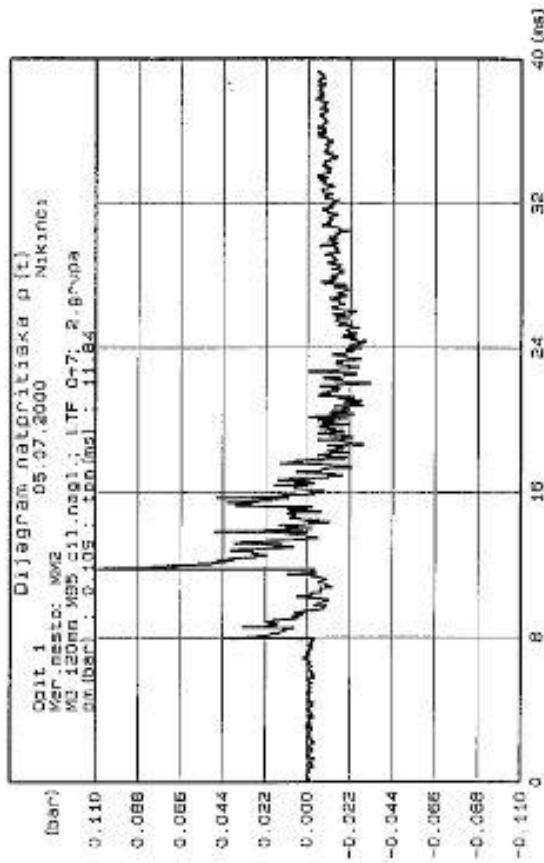
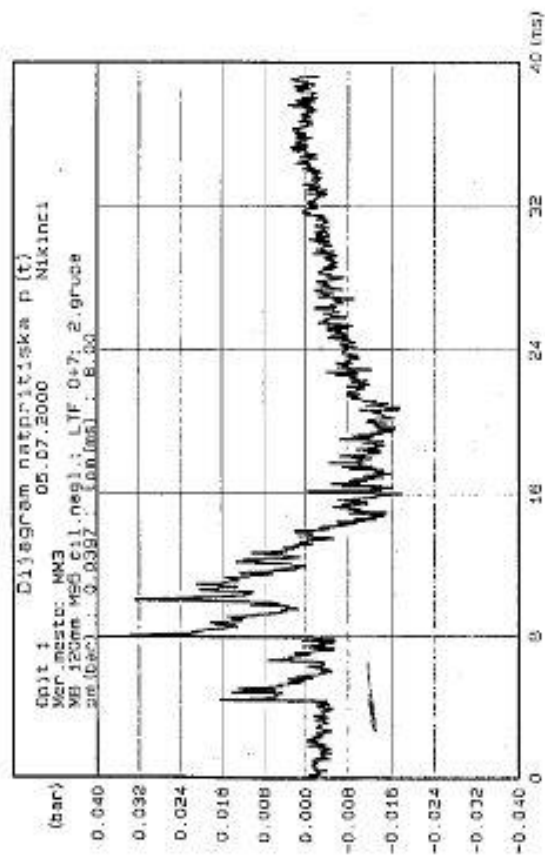
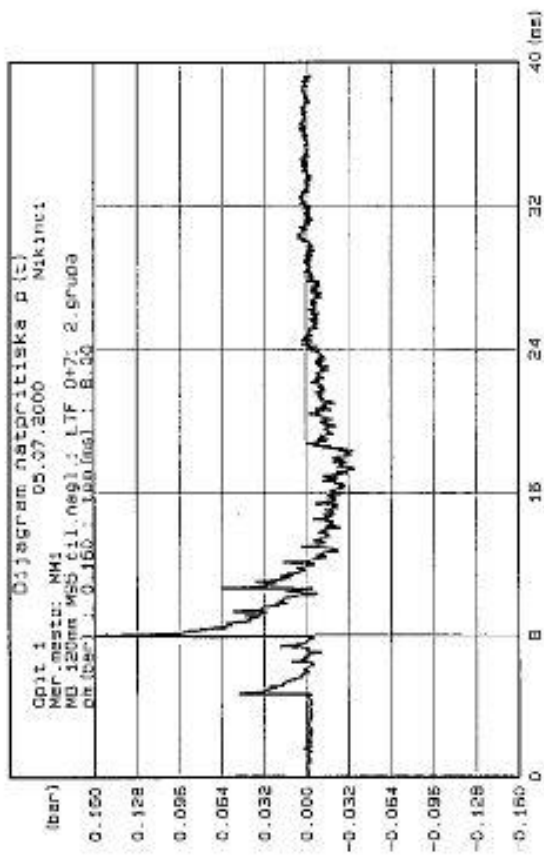


Odreda izvršena po programu UT/MRS

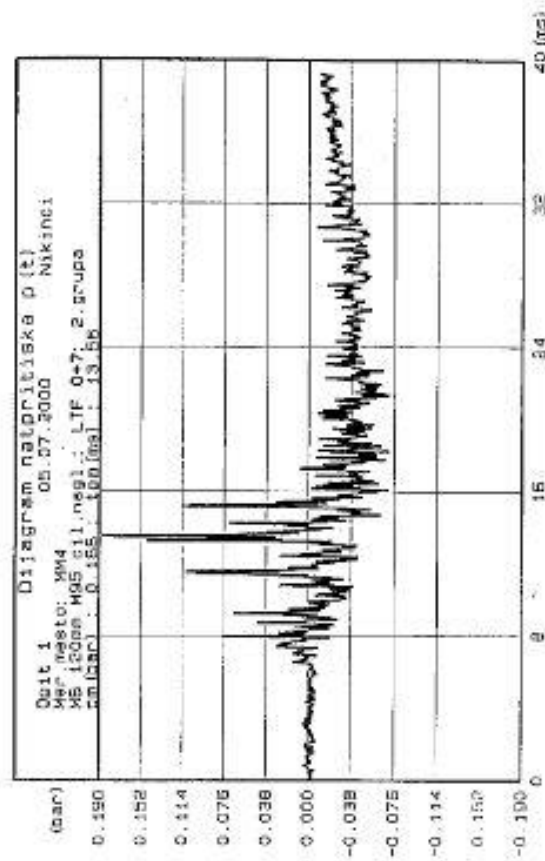
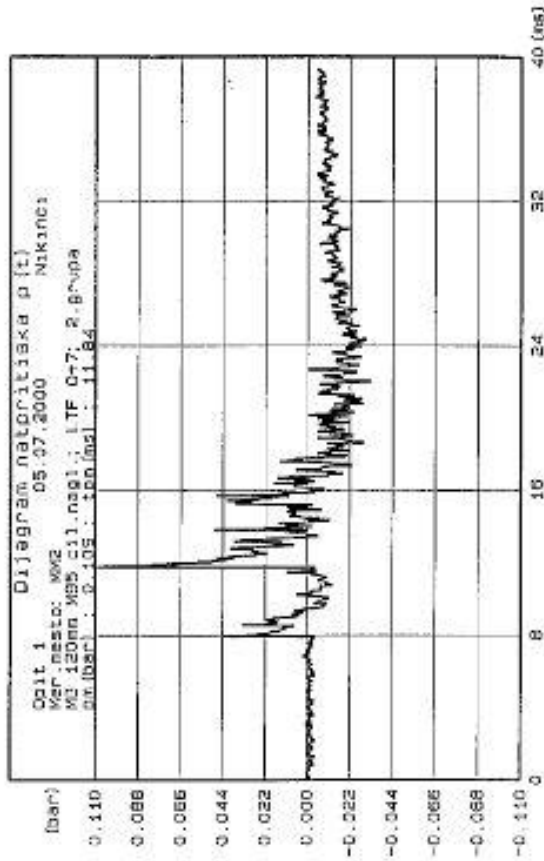
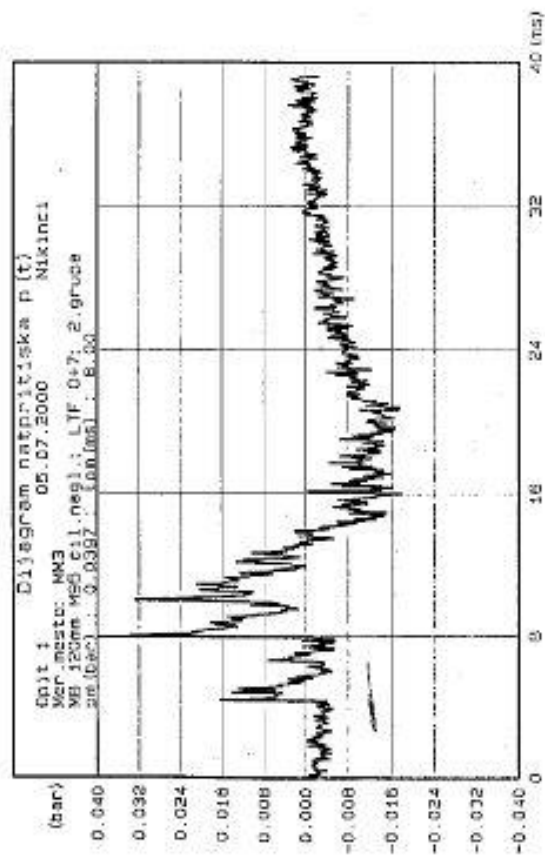
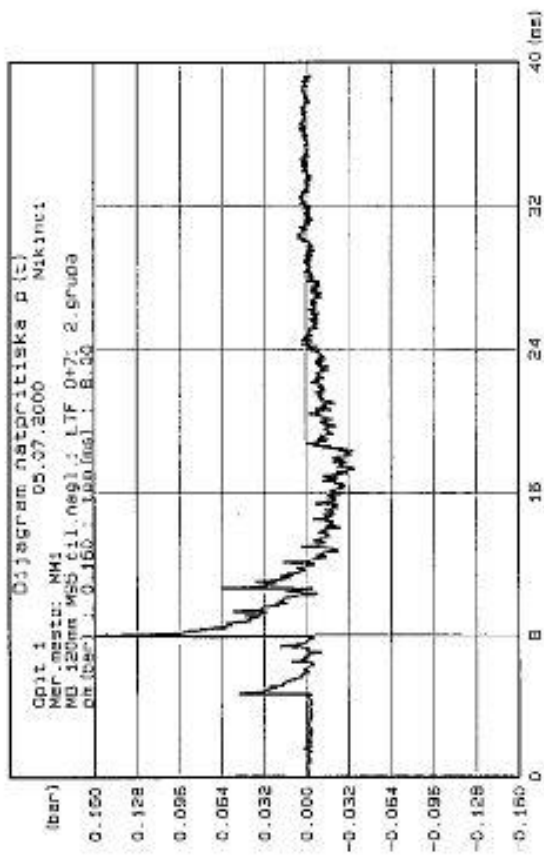


Čerada izvršena po programu UT/M95

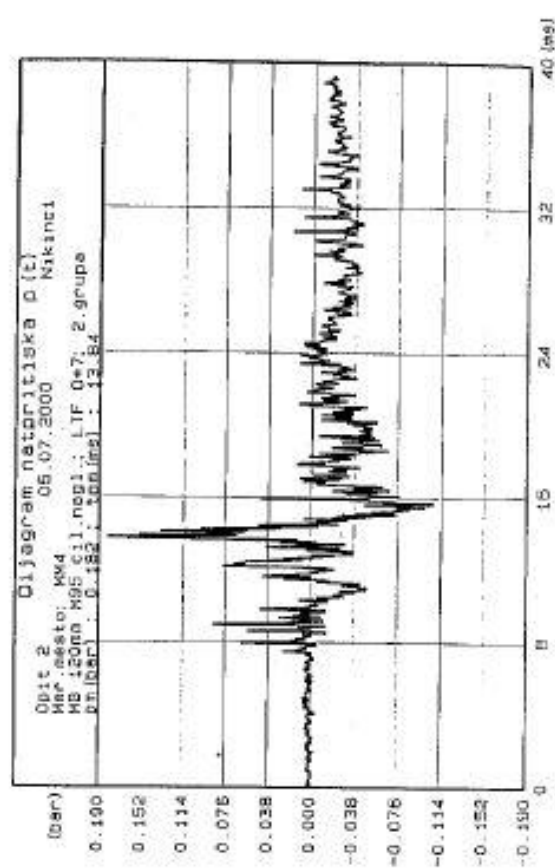
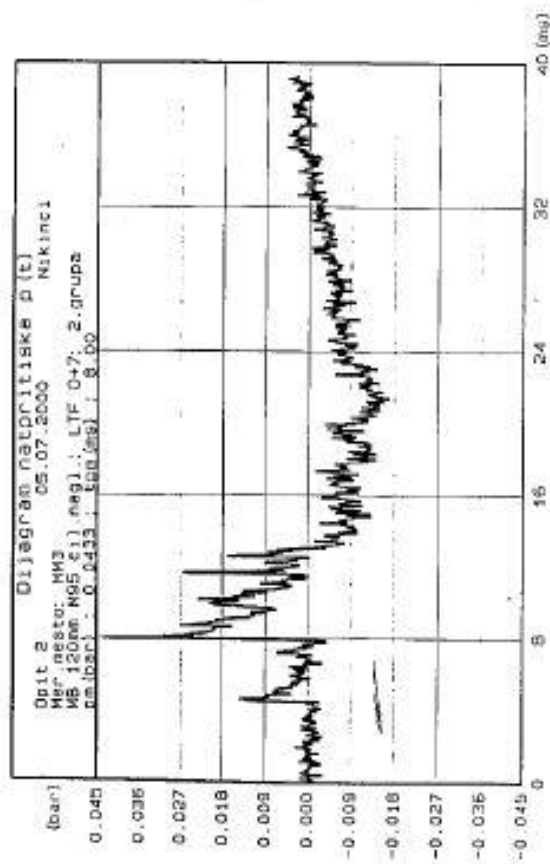
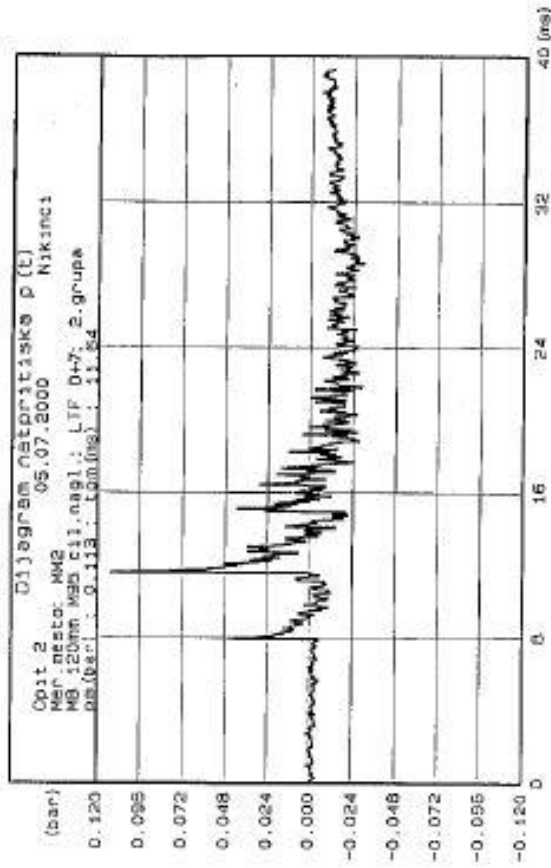
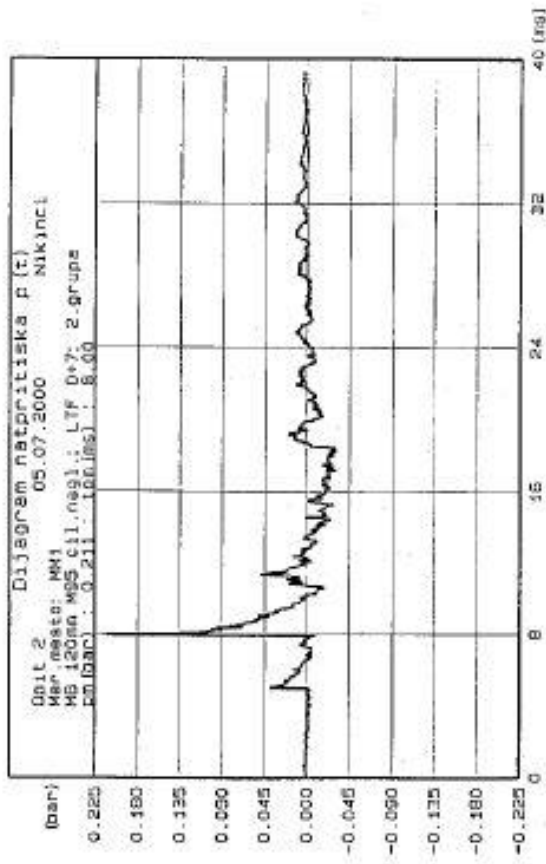
Прилог 2.2 – Графици натпритиска опаљење из МБ 120 мм М95 са мином 120 мм М62П6, (0+7) б/п, варијанта "Б"



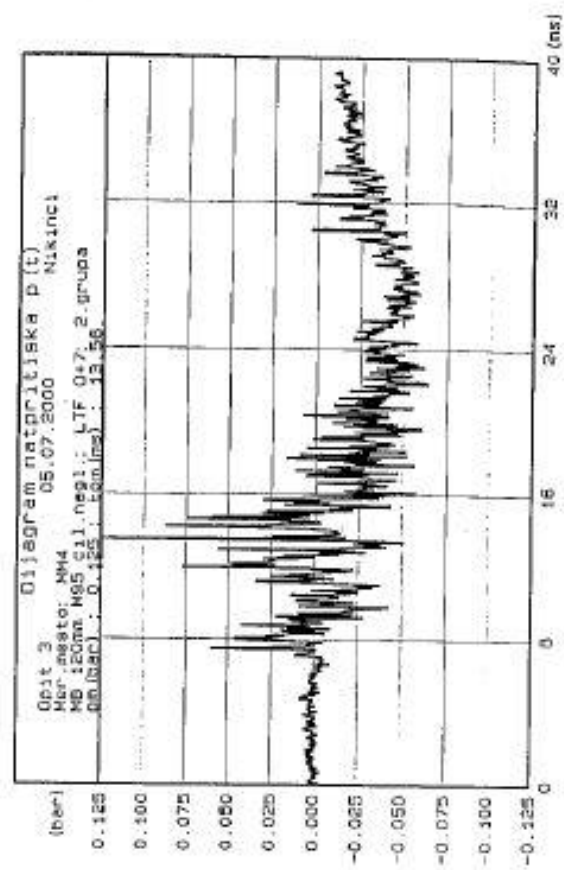
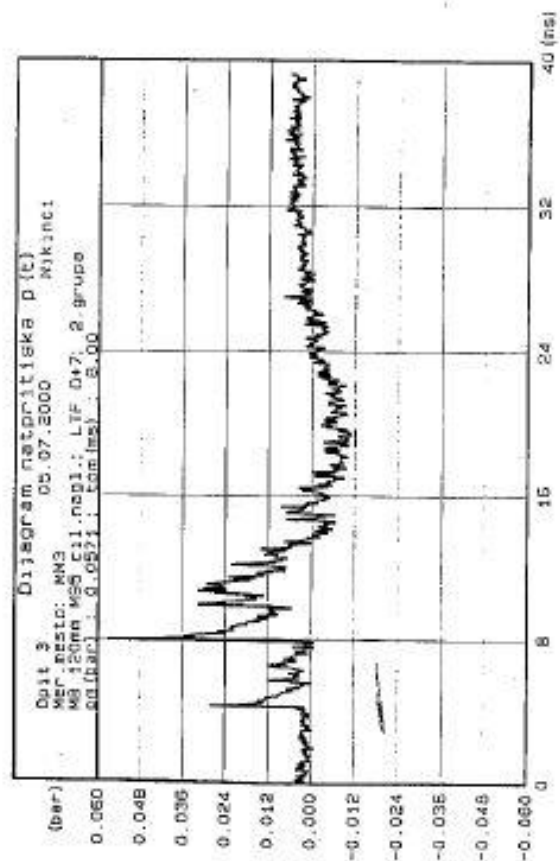
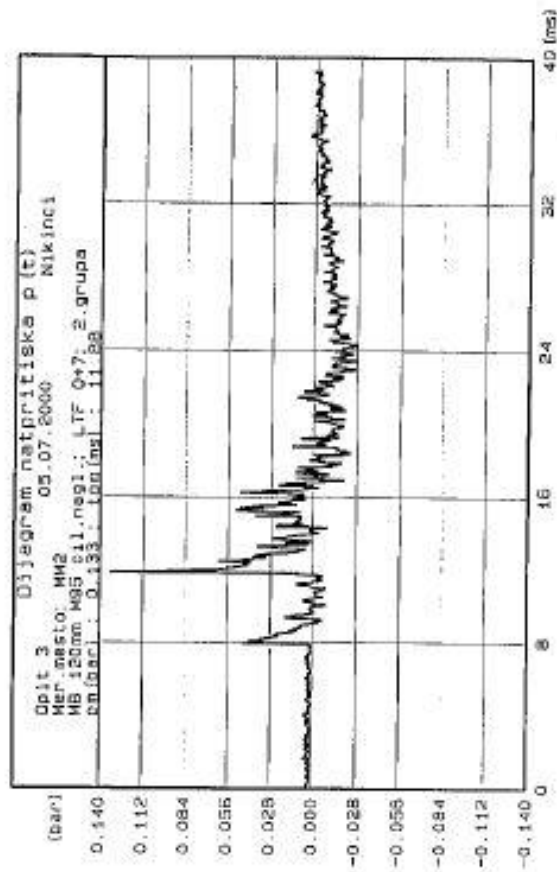
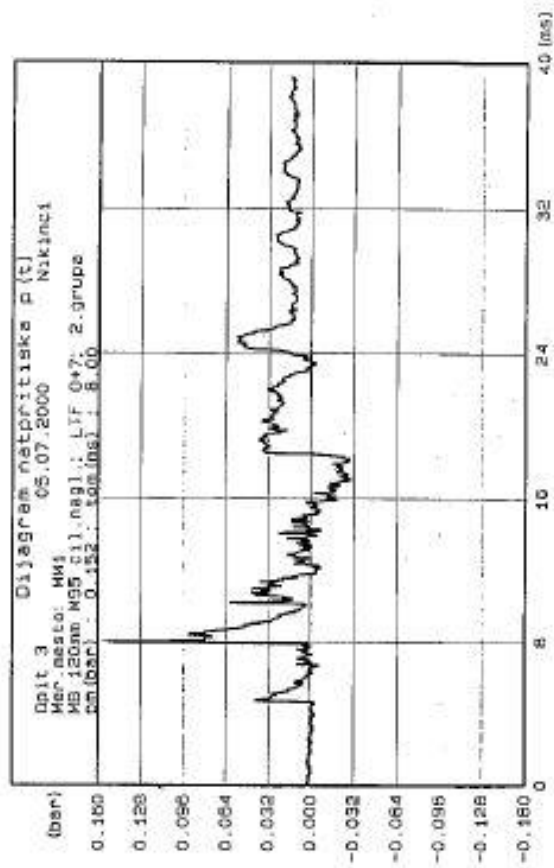
Obrada izvršena po programu UT/MCB



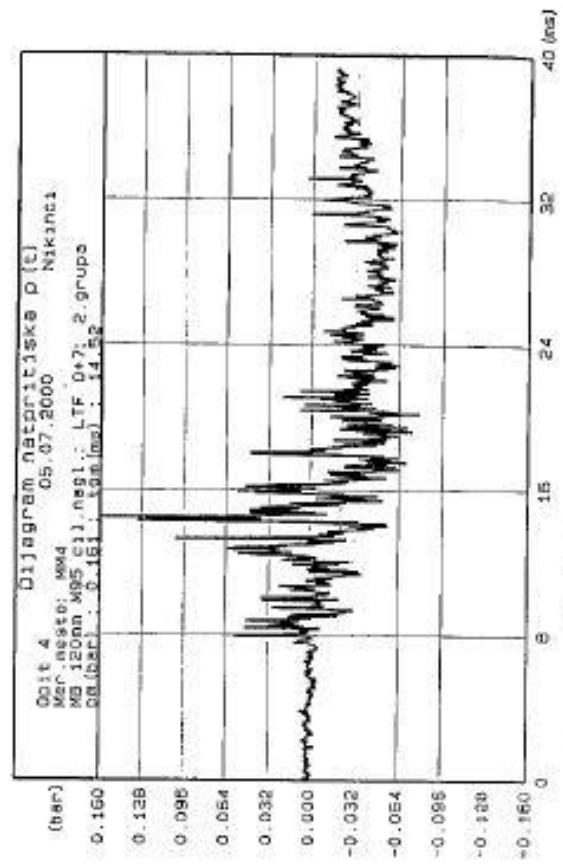
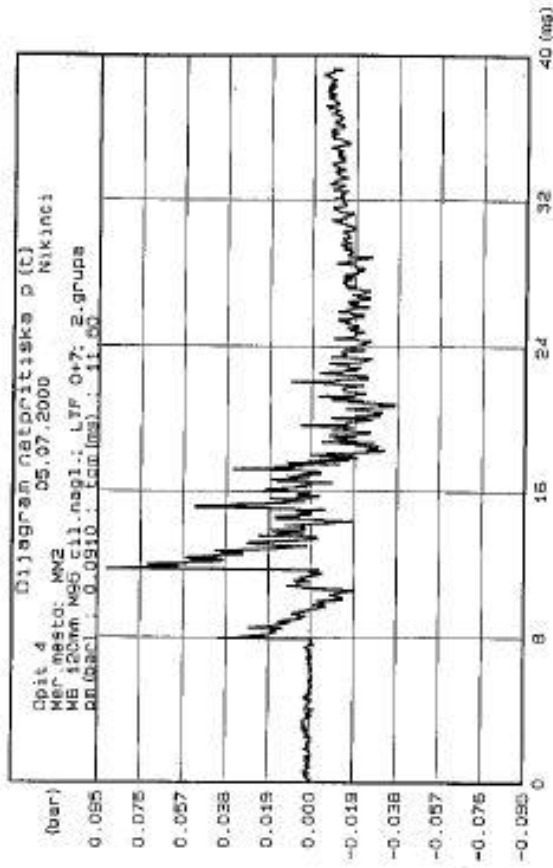
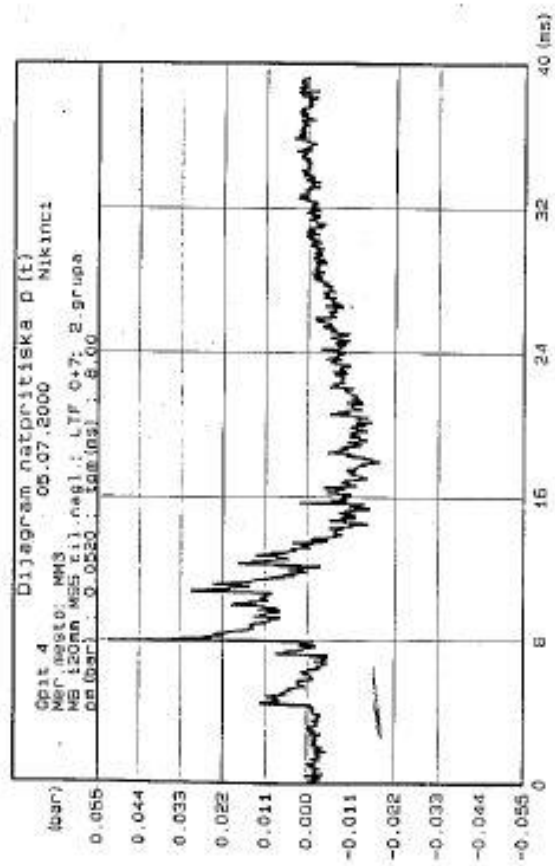
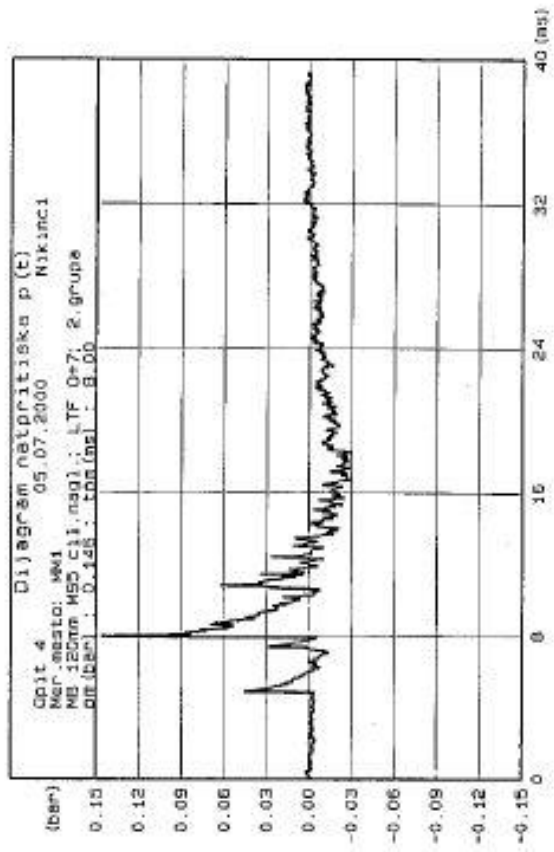
Obreda izvršena po programu UT/MCB



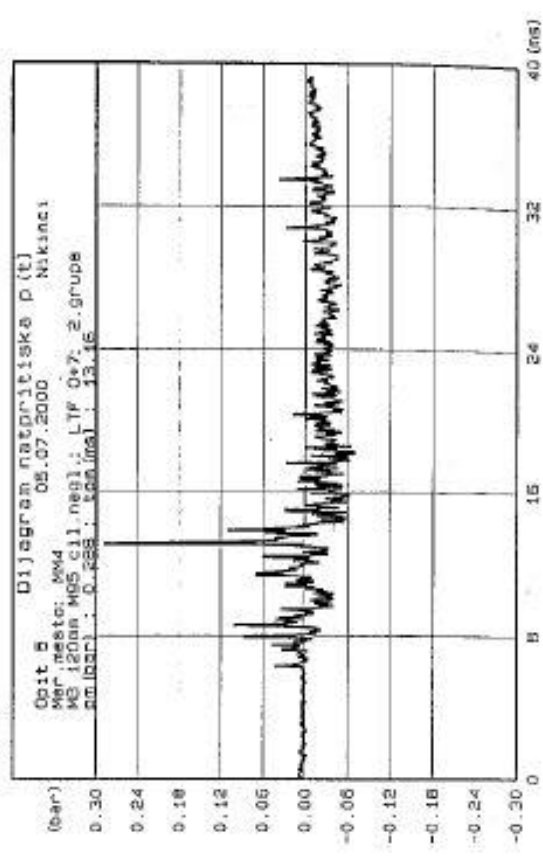
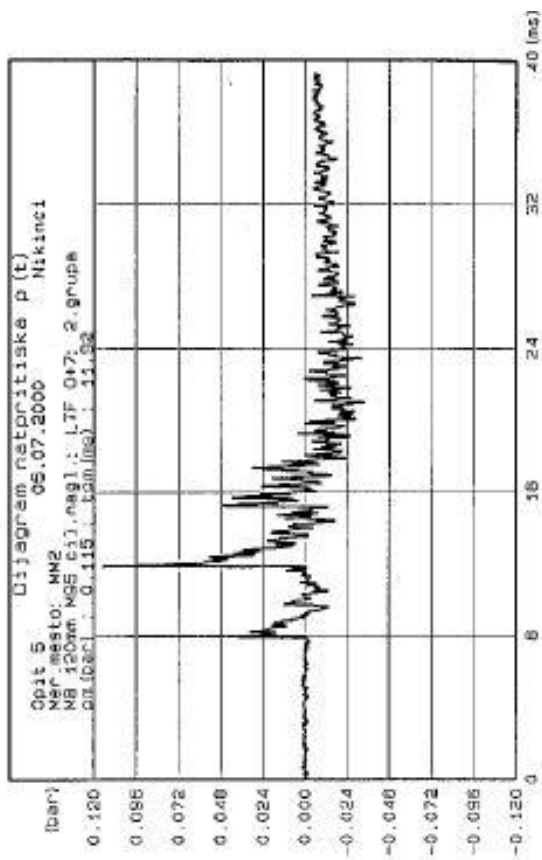
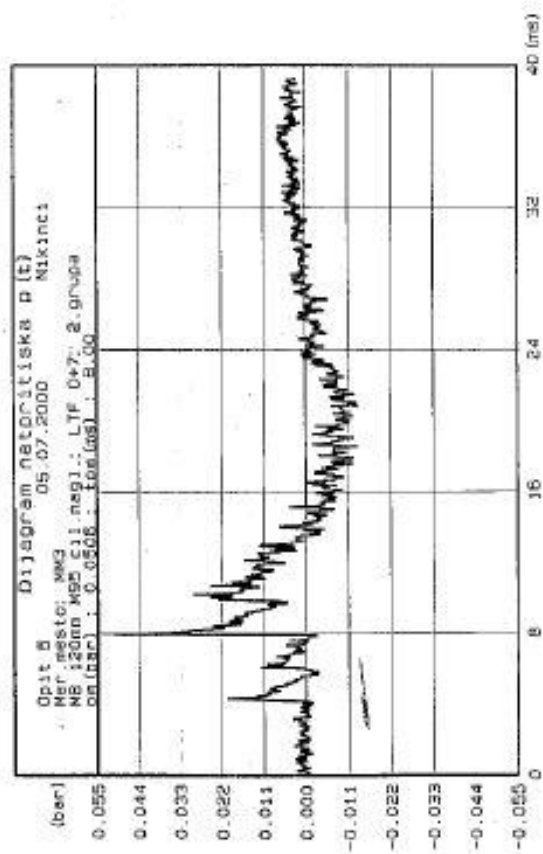
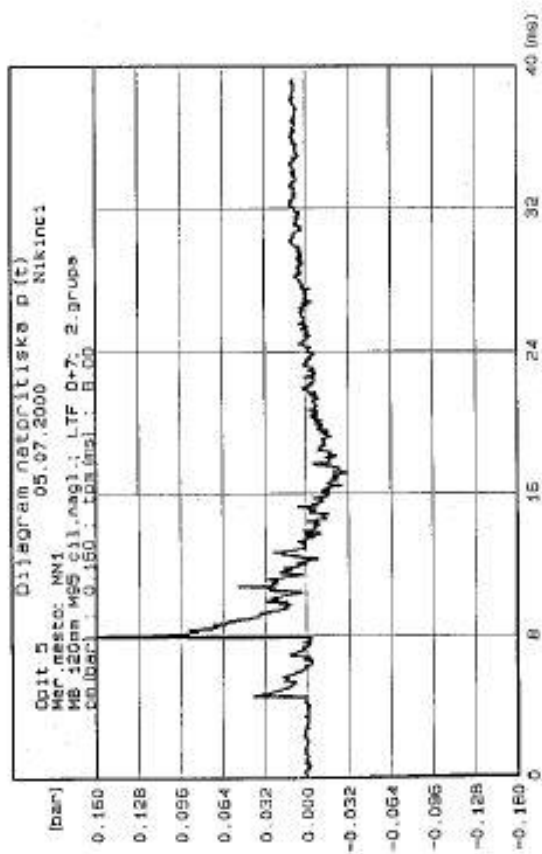
Crtača izvršena po programu UT/MRB



Obroda izvršena po programu UT/MRS

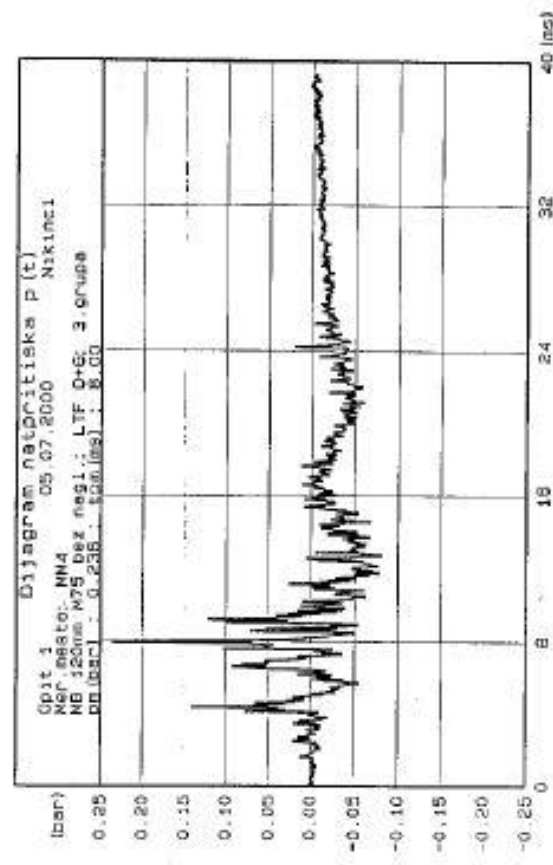
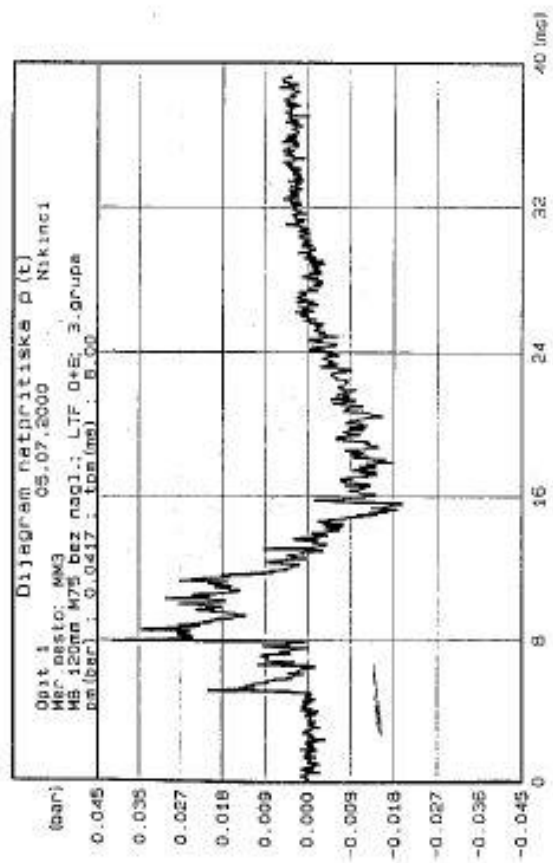
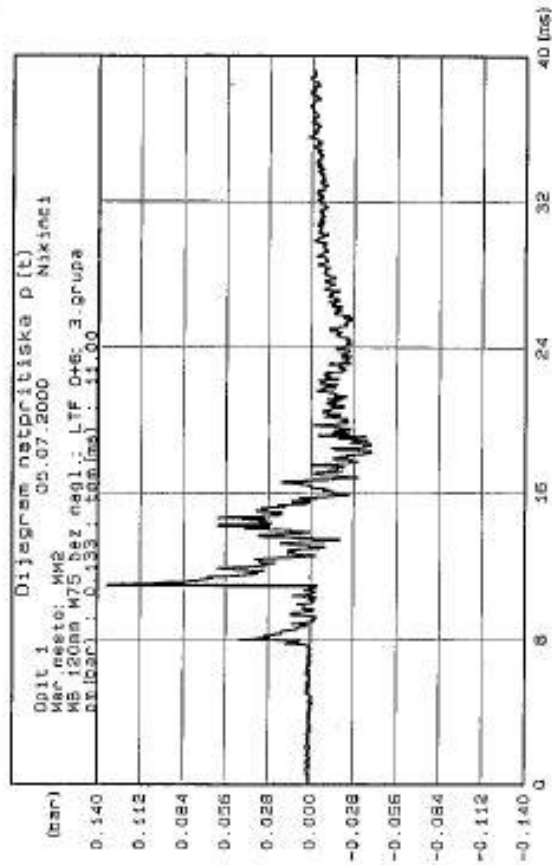
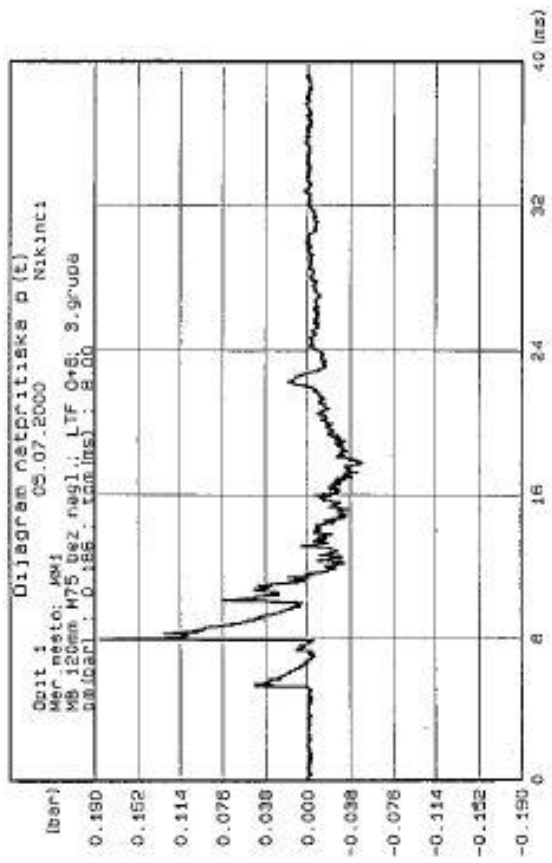


Obrađeno izvršeno po programu UT/NRB

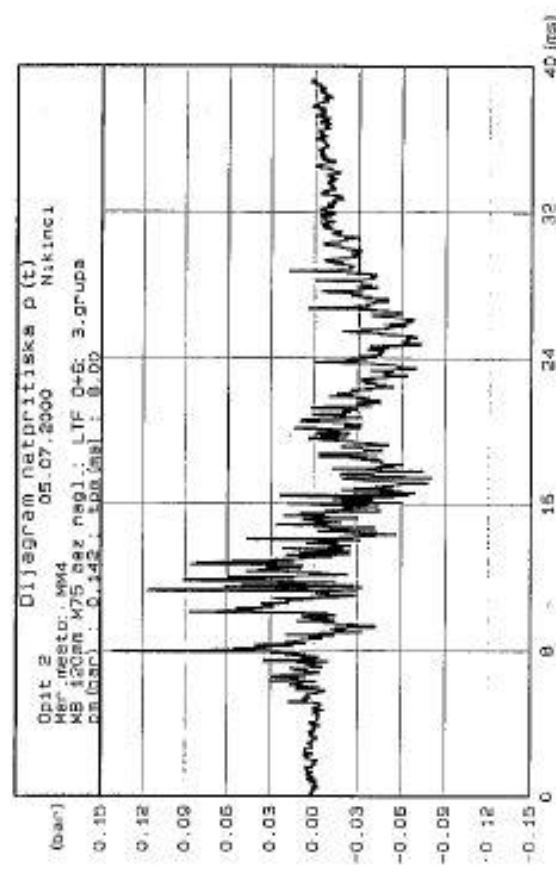
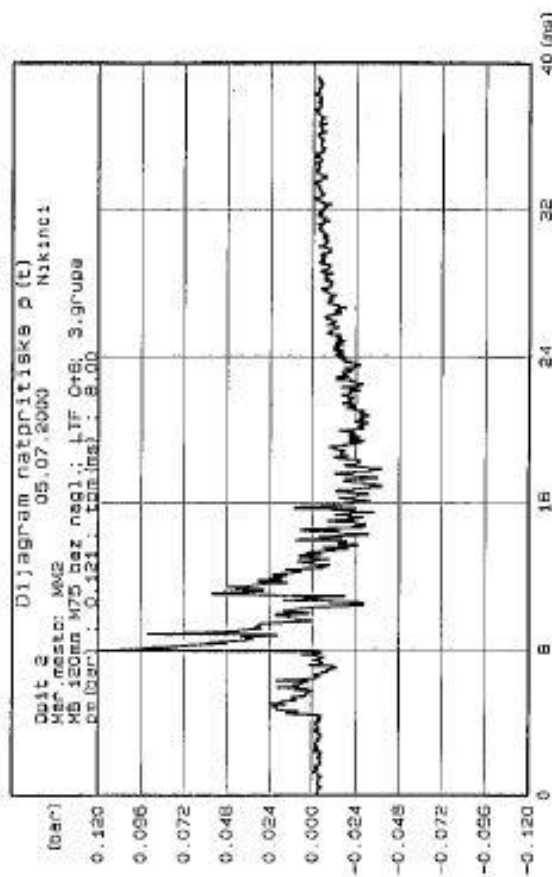
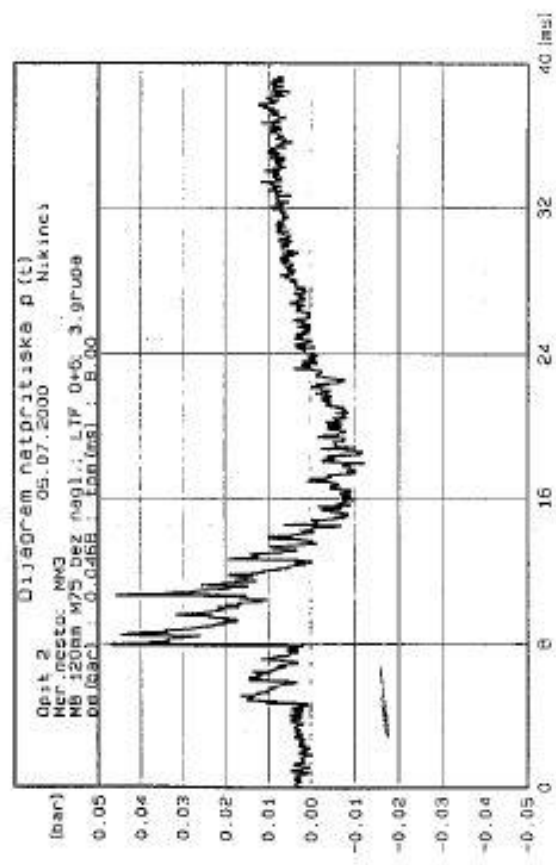
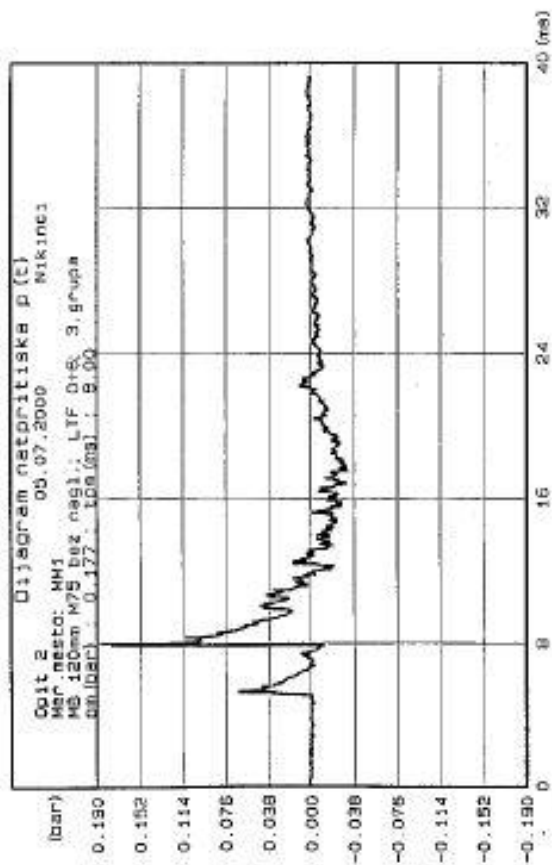


Opis izvršena po programu UT/M9B

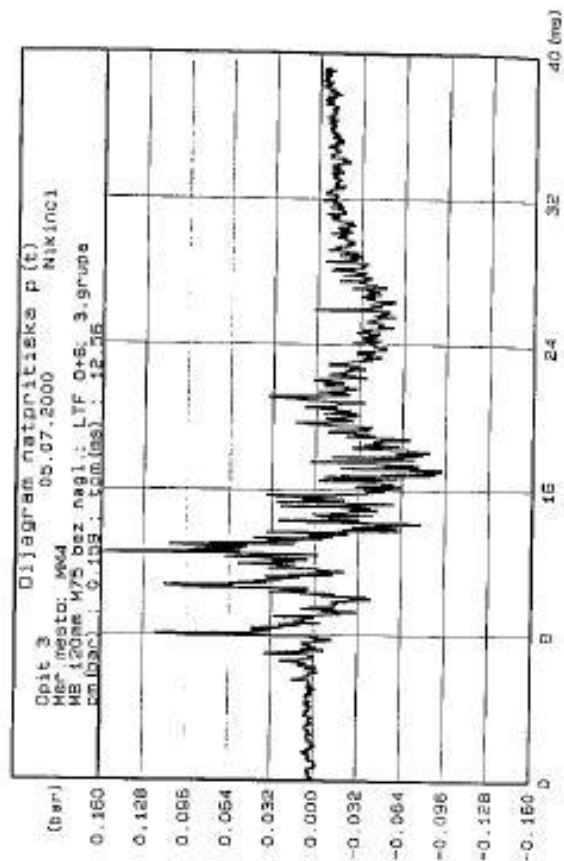
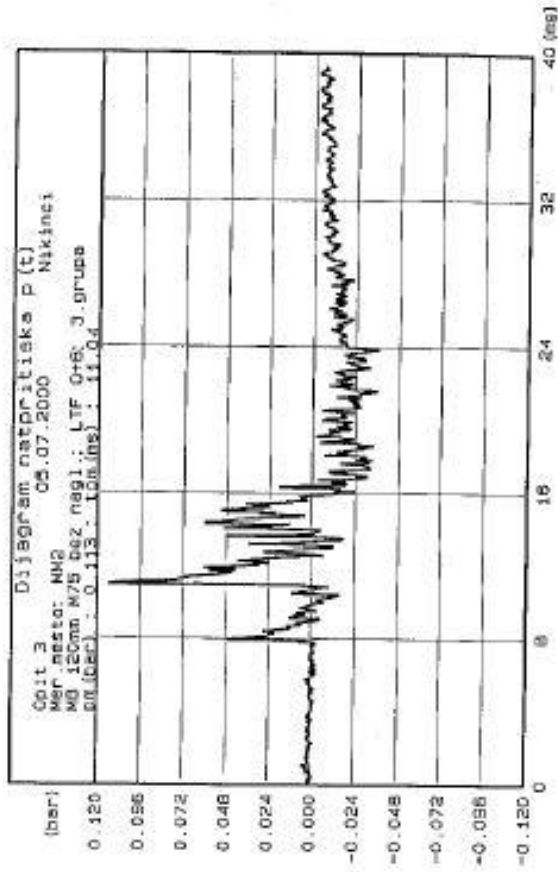
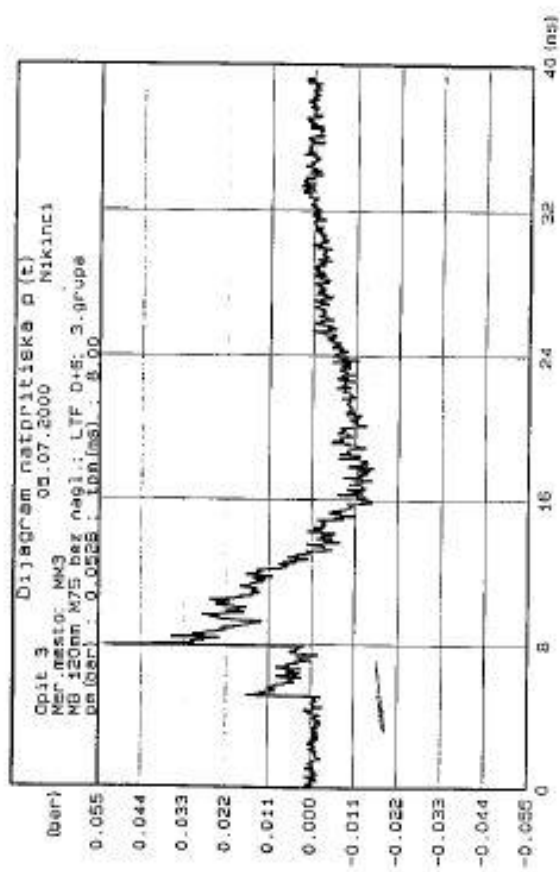
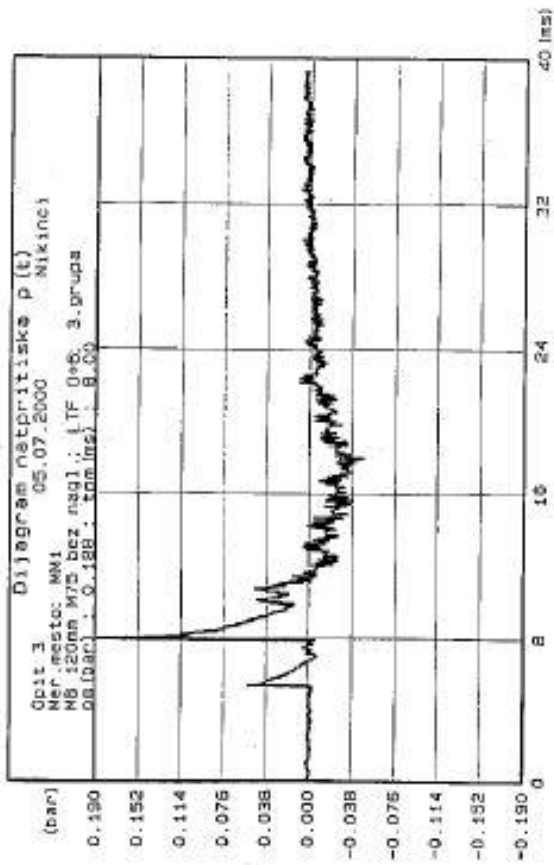
Прилог 2.3 – Графици натпритиска опаљење из МБ 120 мм М95 са мином 120 мм М62П6, (0+7) б/п, варијанта "Ц"



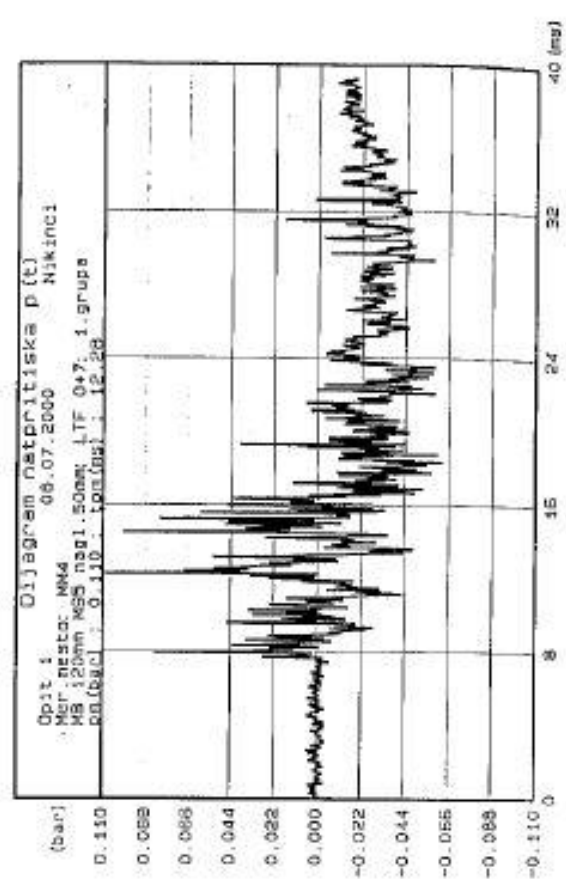
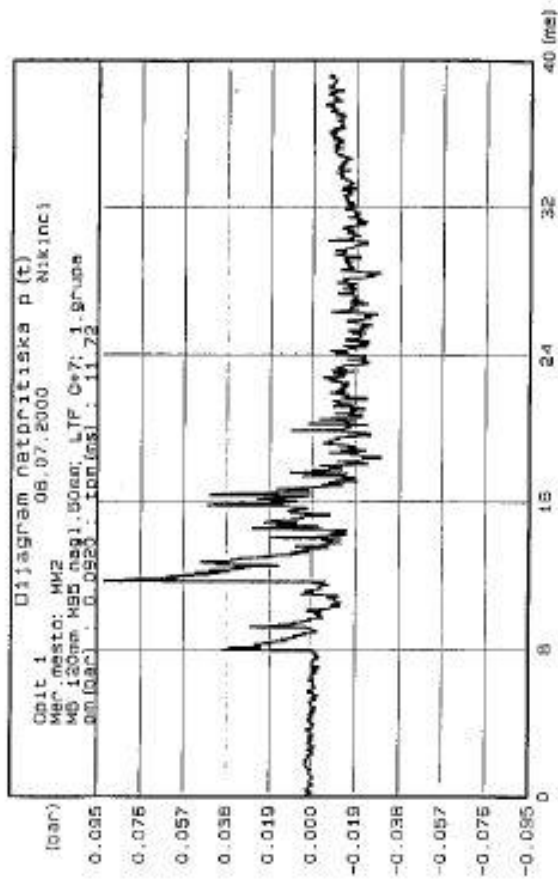
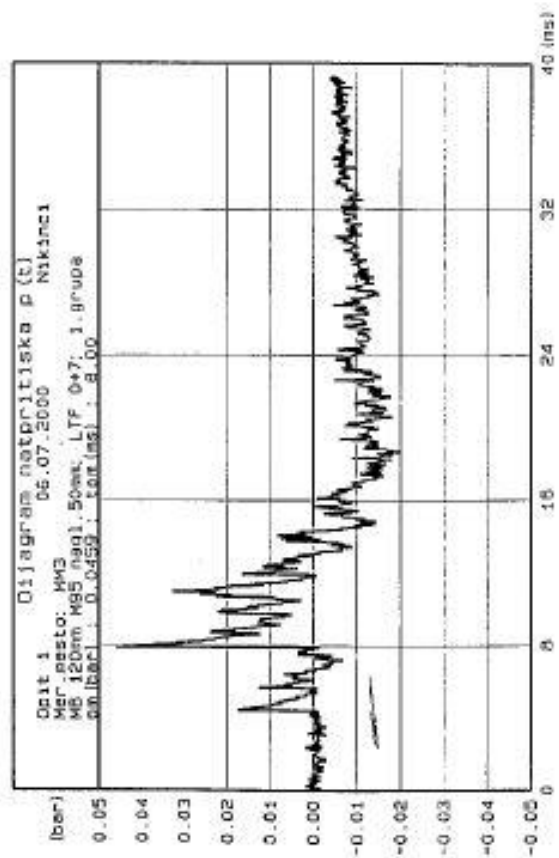
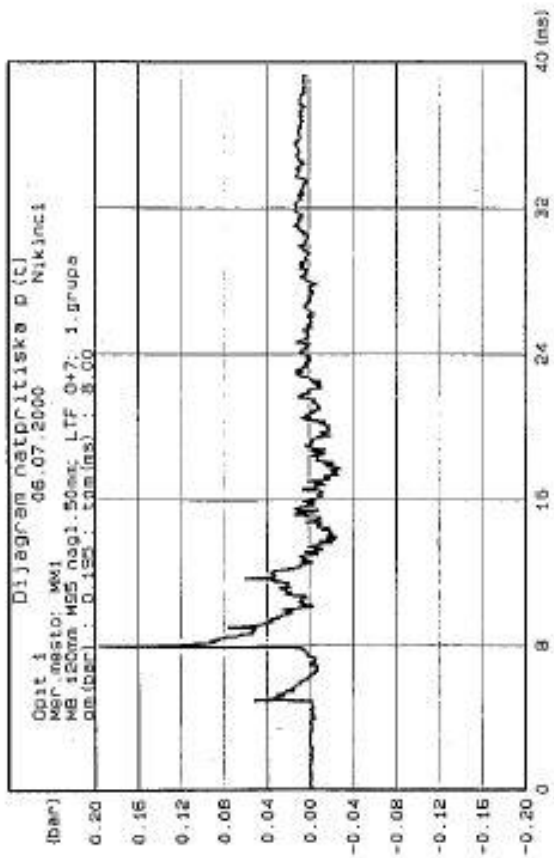
Obrađe izvršene po programu UT/MRS



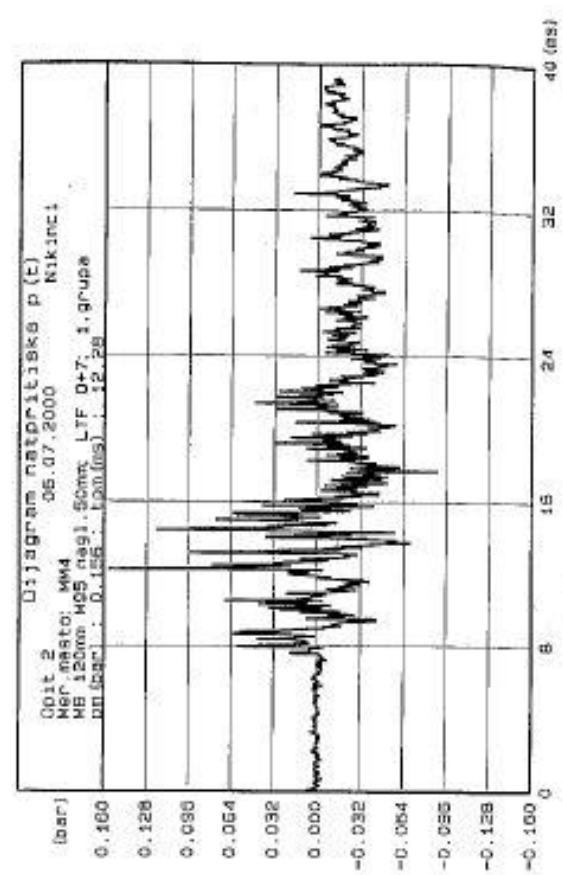
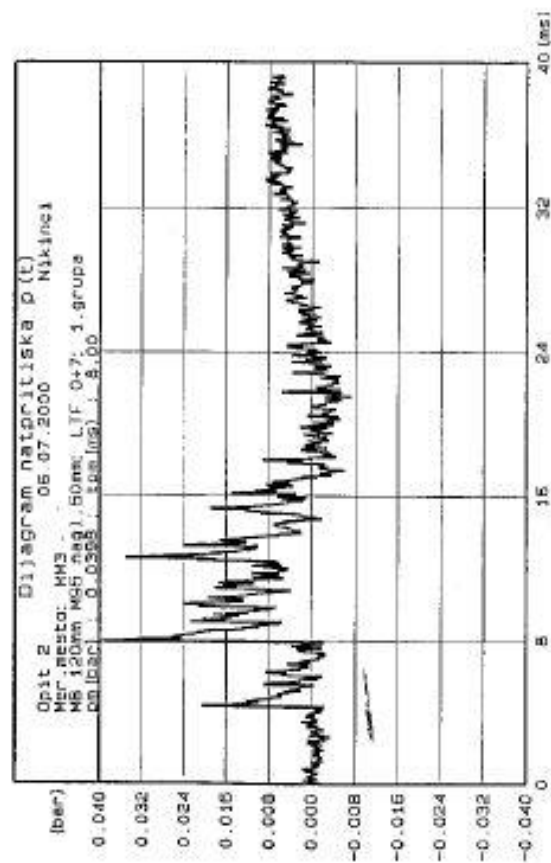
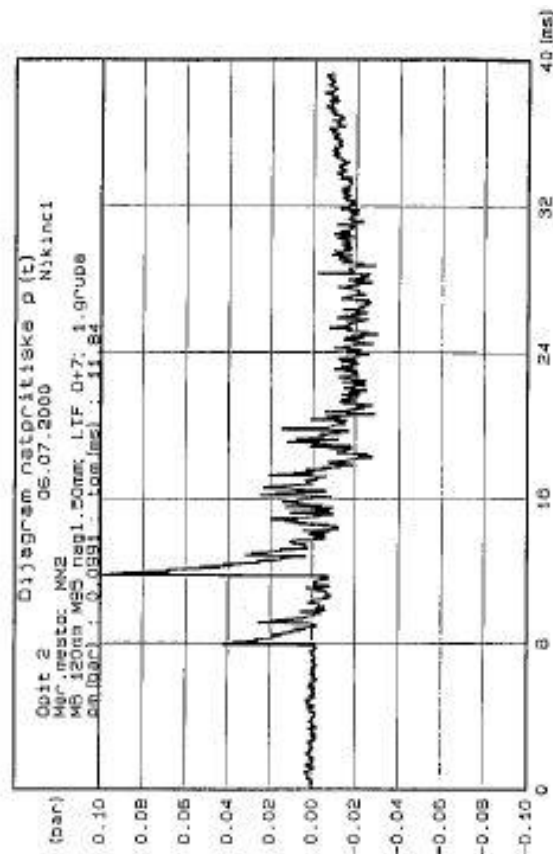
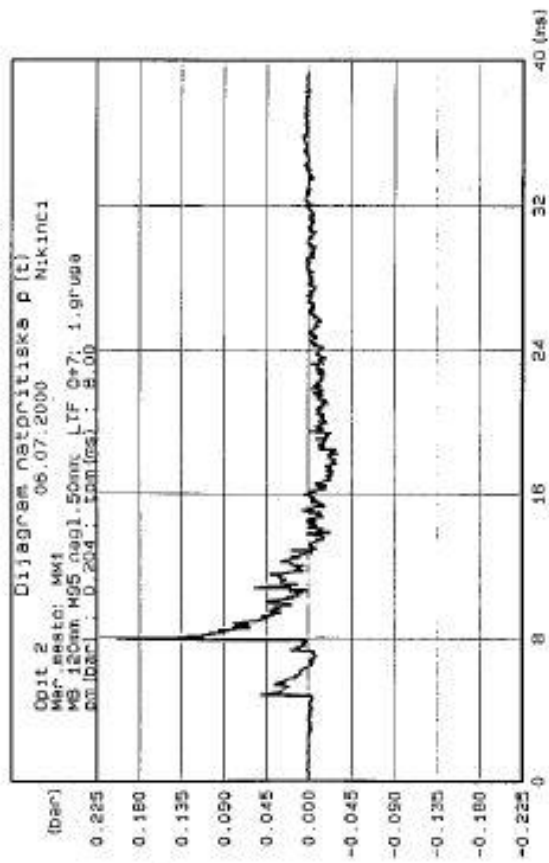
Obrasc izvrsena po programu UT/WAB



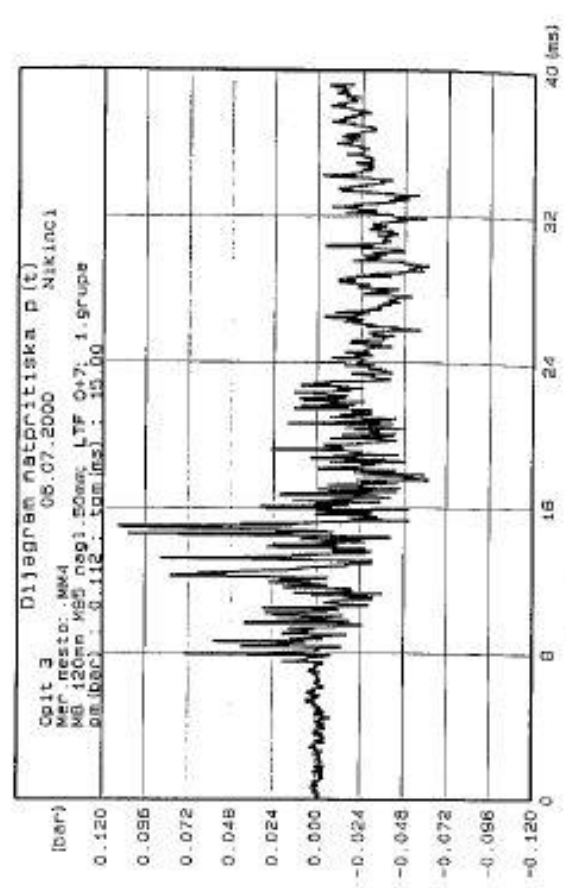
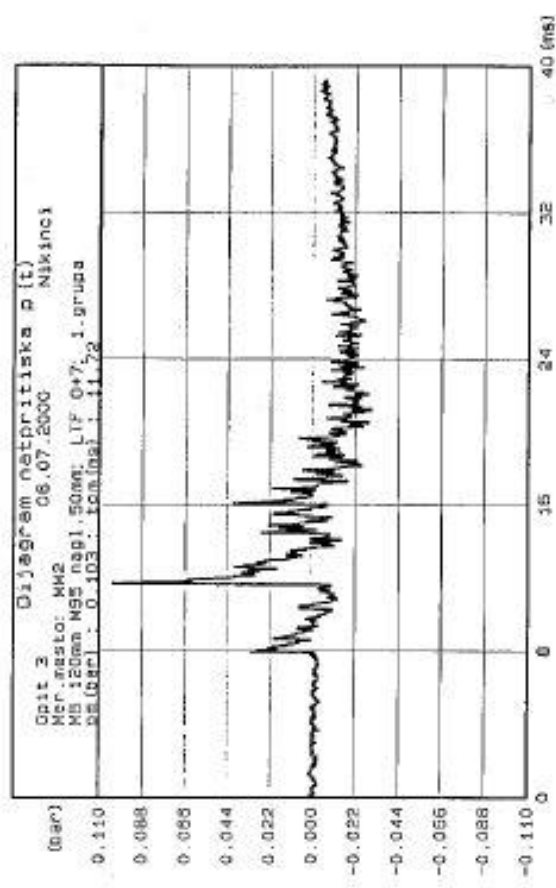
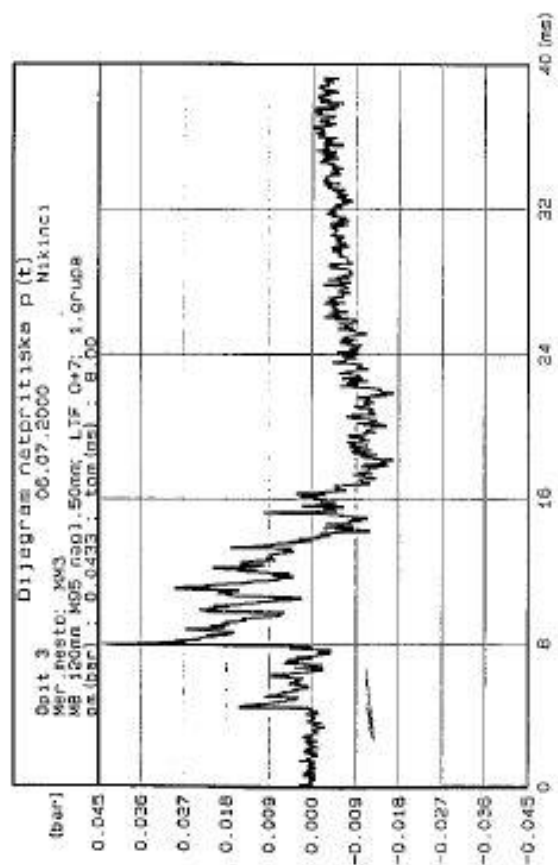
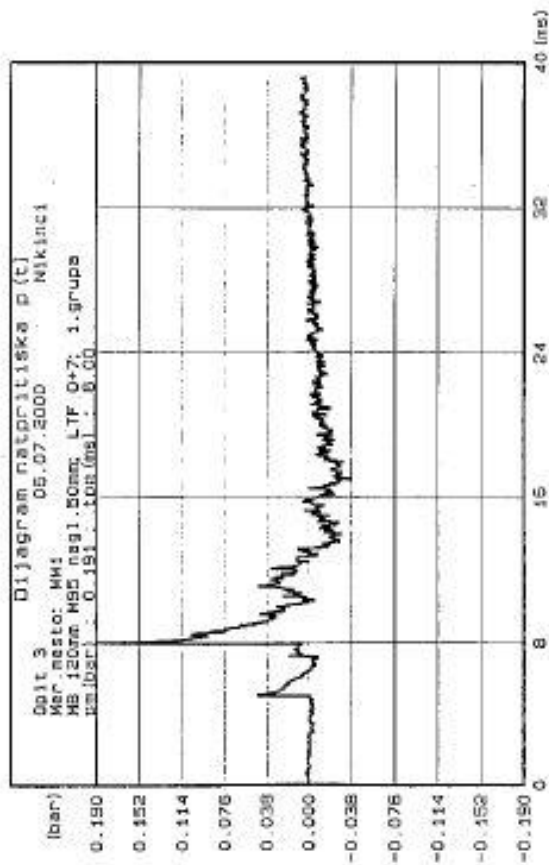
Podaci izvršene po programu UT/MRS



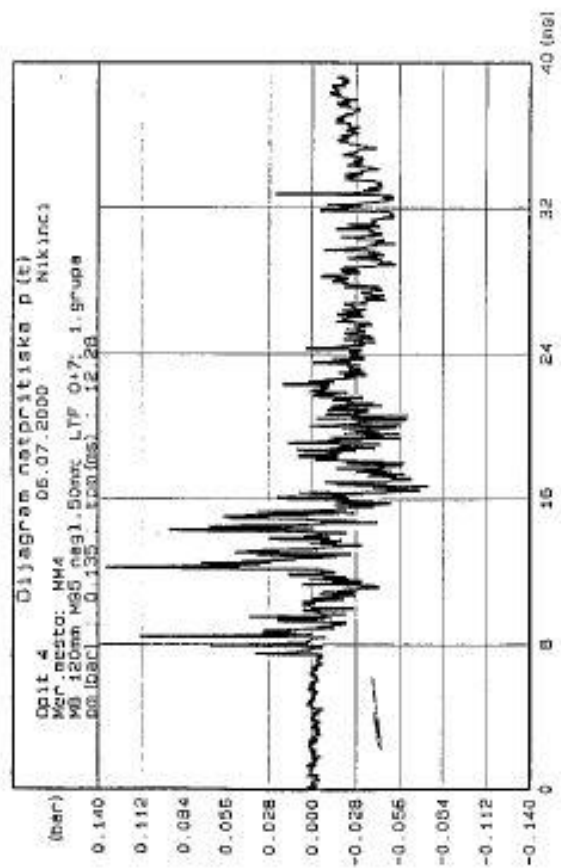
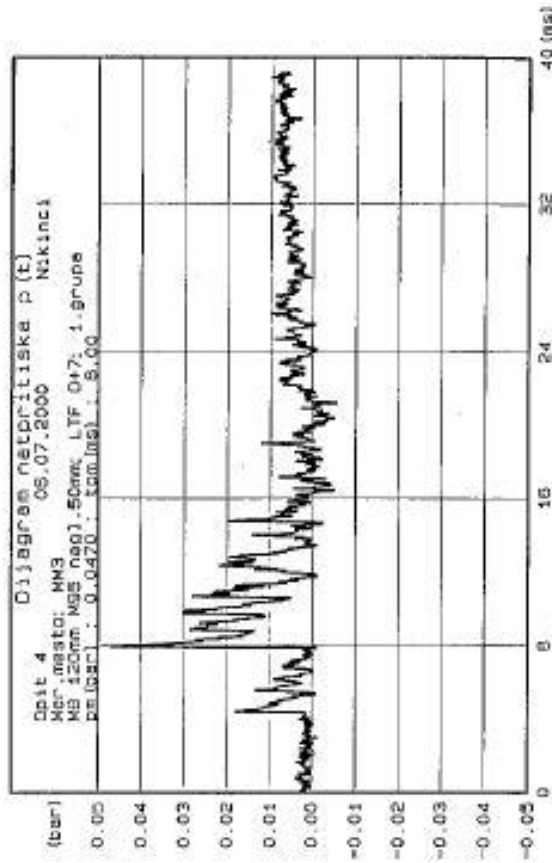
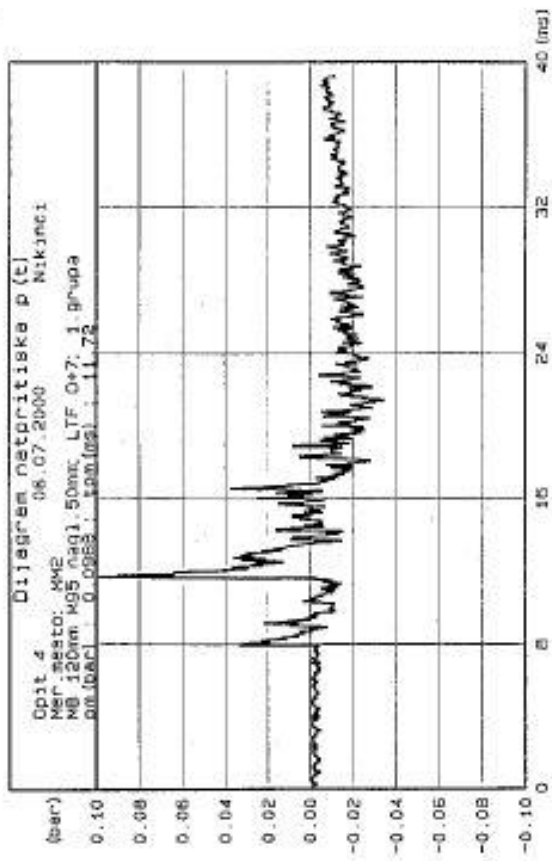
Obrada izvršena po programu UT/NAB



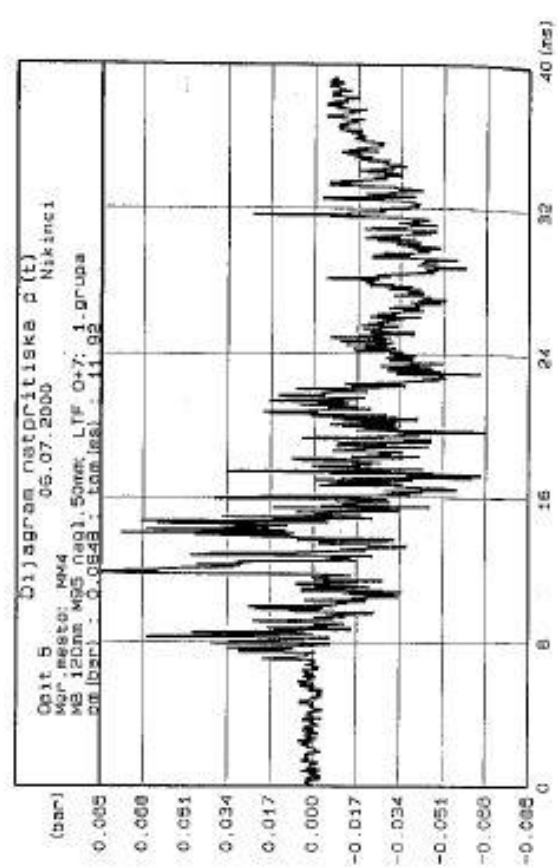
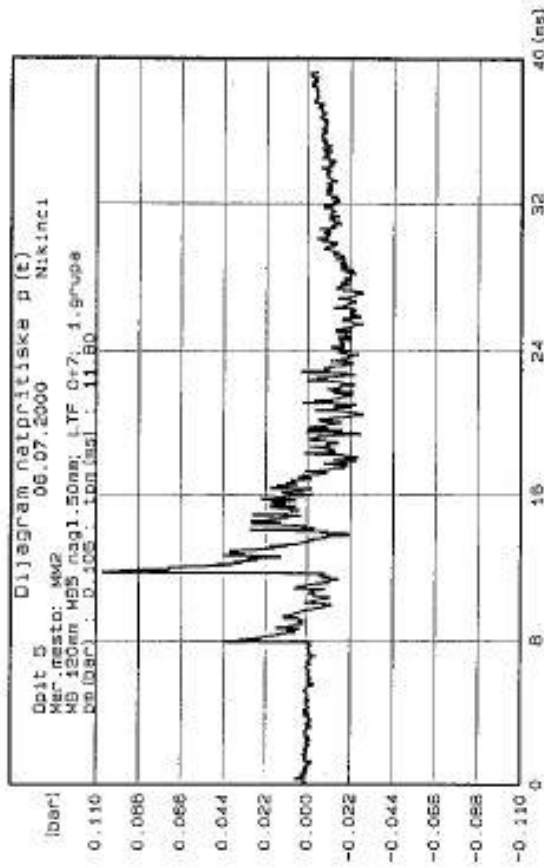
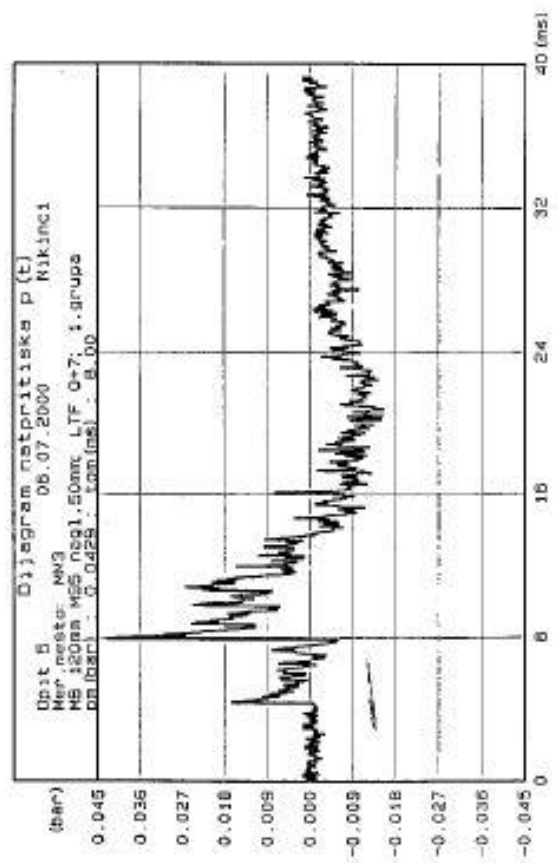
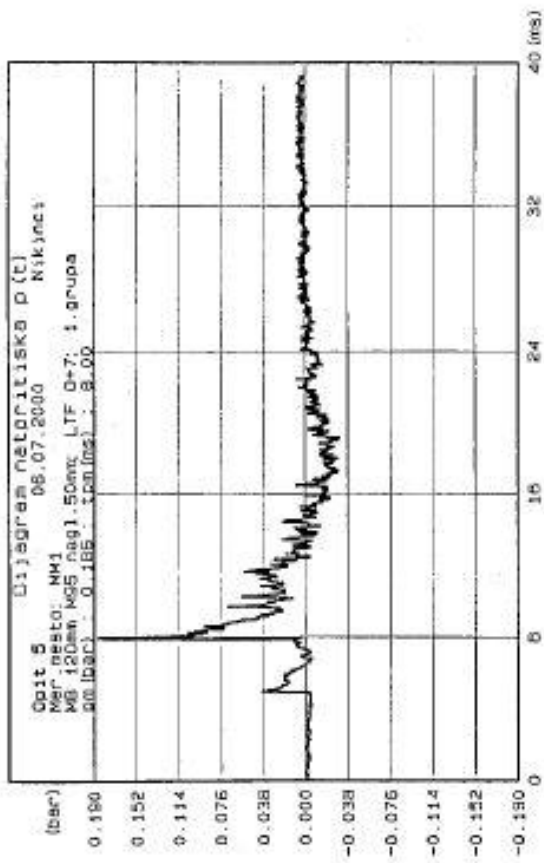
Obrađeno prema programu UT/MRG



Opit 3 izvrsena po programu UT/MSB

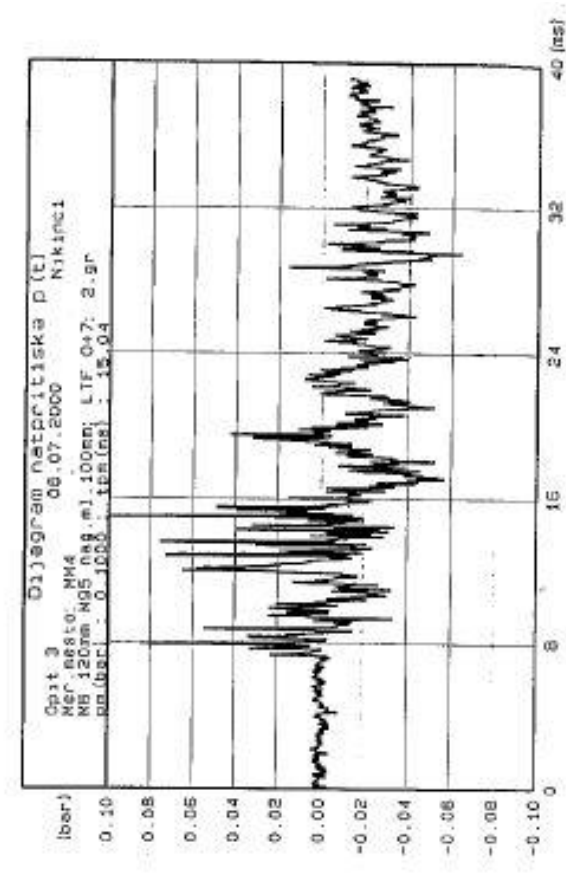
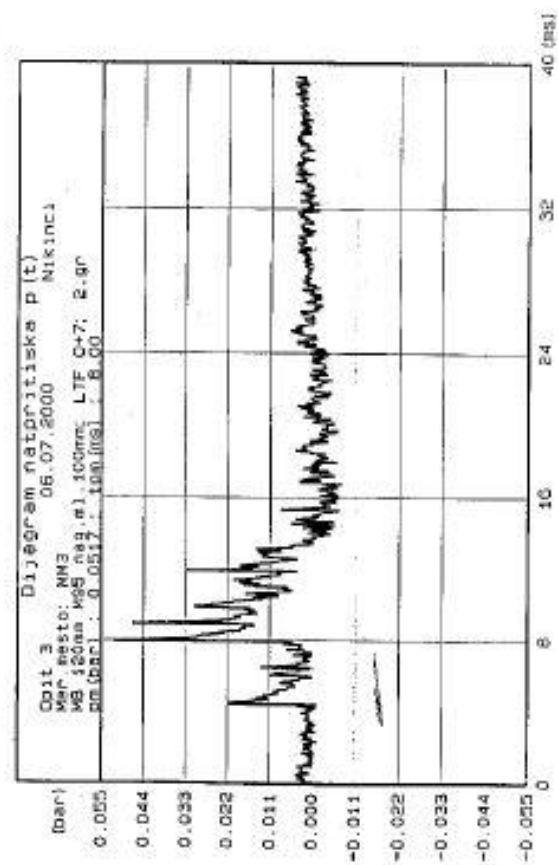
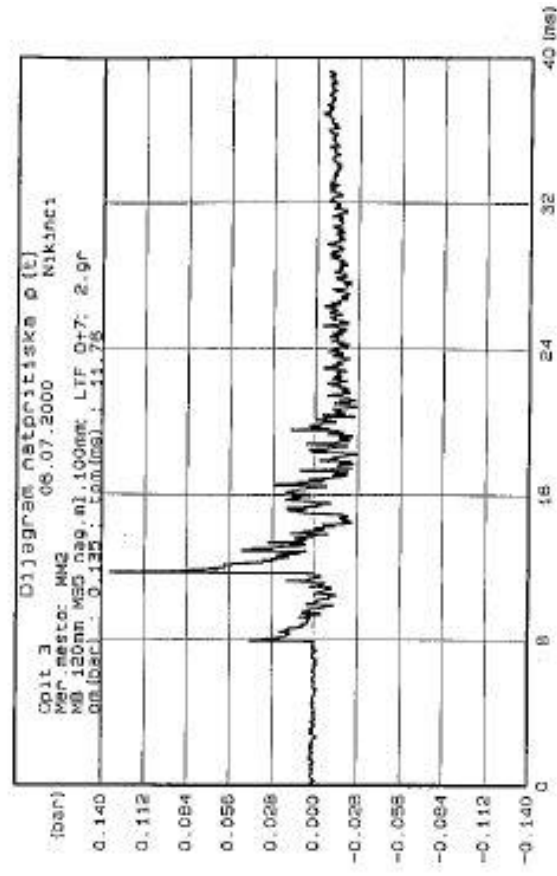
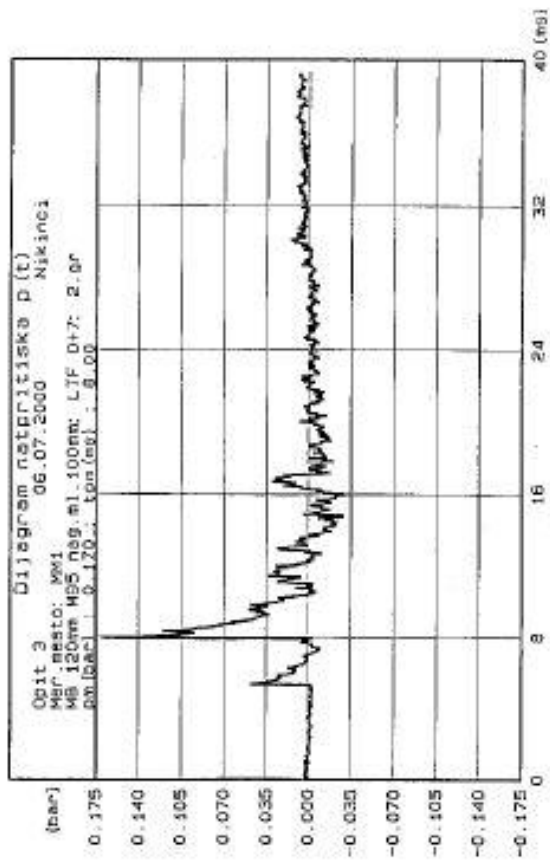


Gerade izvršena po programu UT/MRE

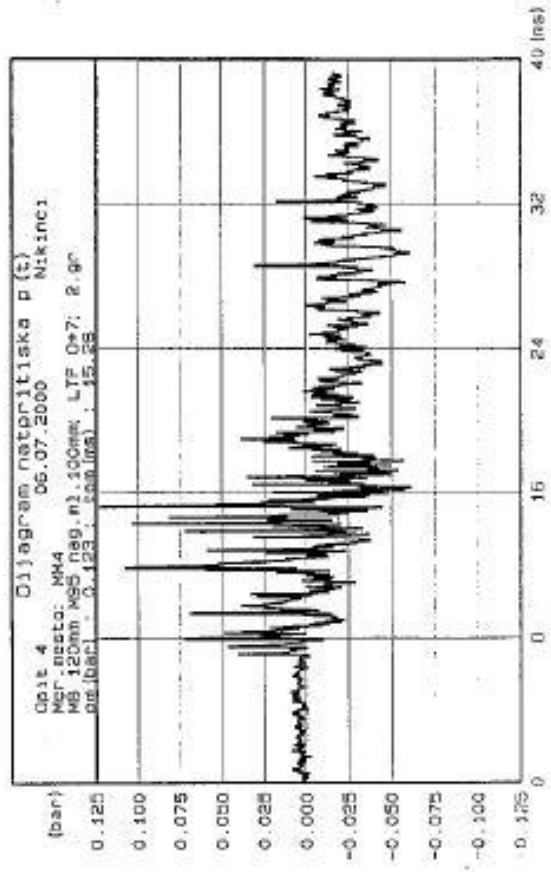
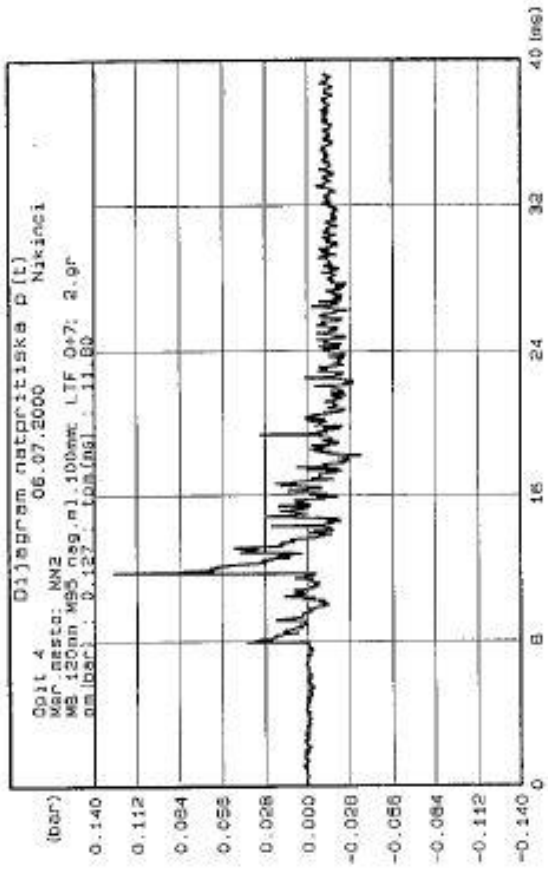
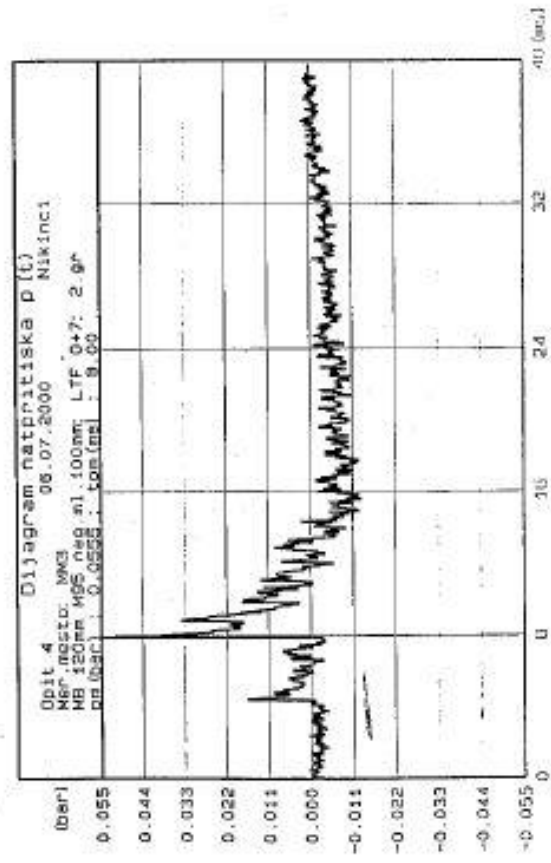
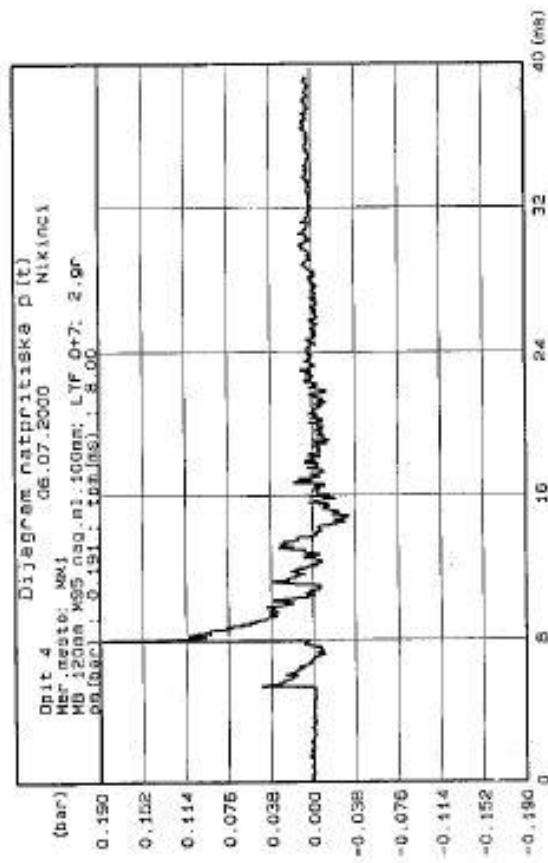


Obrada izvršena po programu UT/NRB

Прилог 2.4 – Графици натпритиска опаљење из МБ 120 мм М95 са мином 120мм М62П6, (0+7) б/п, варијанта "Д"

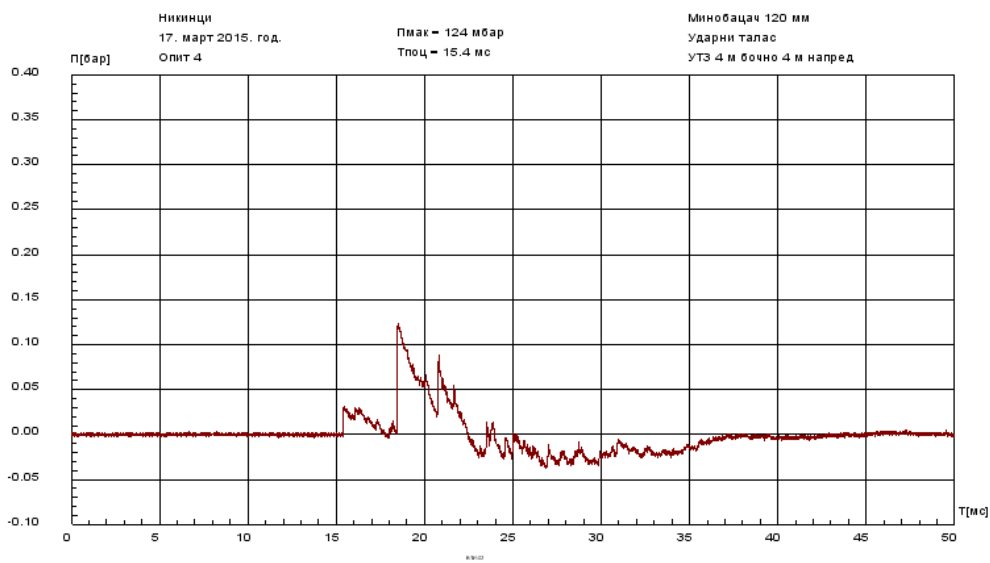
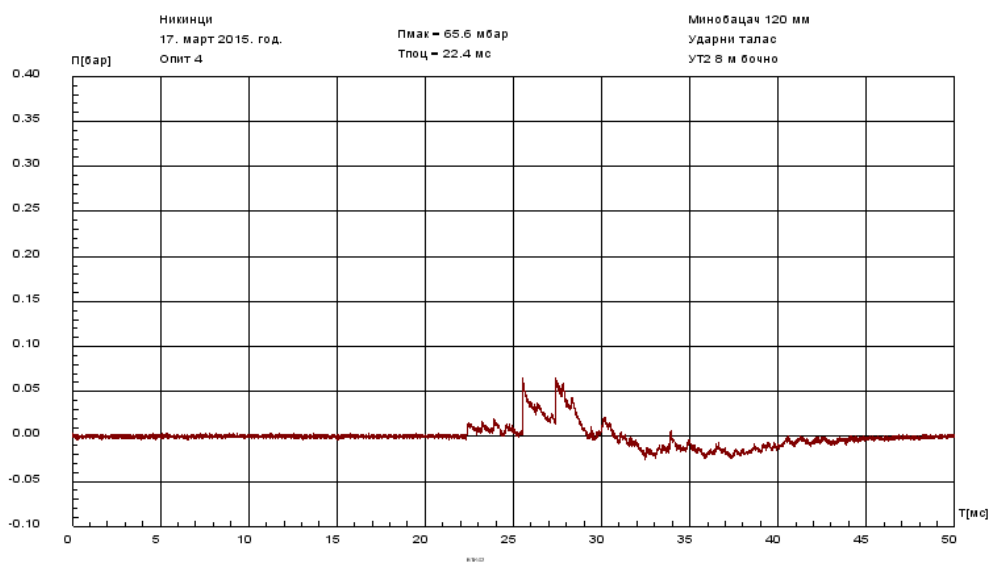
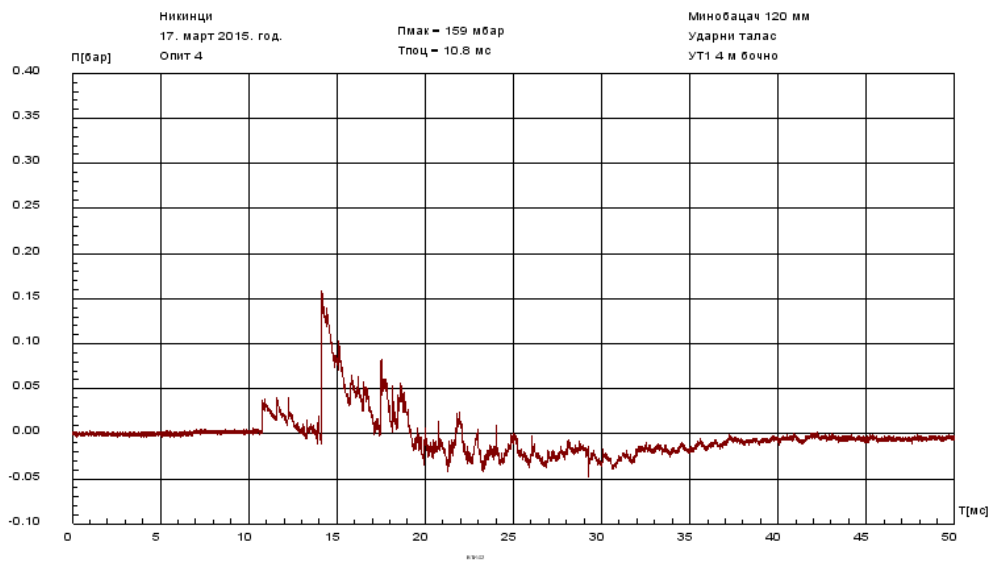


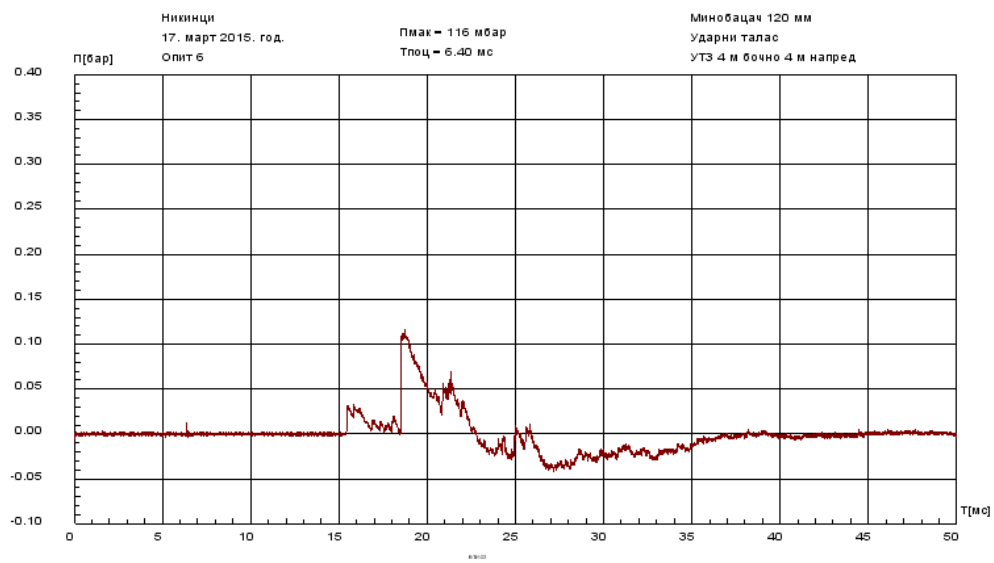
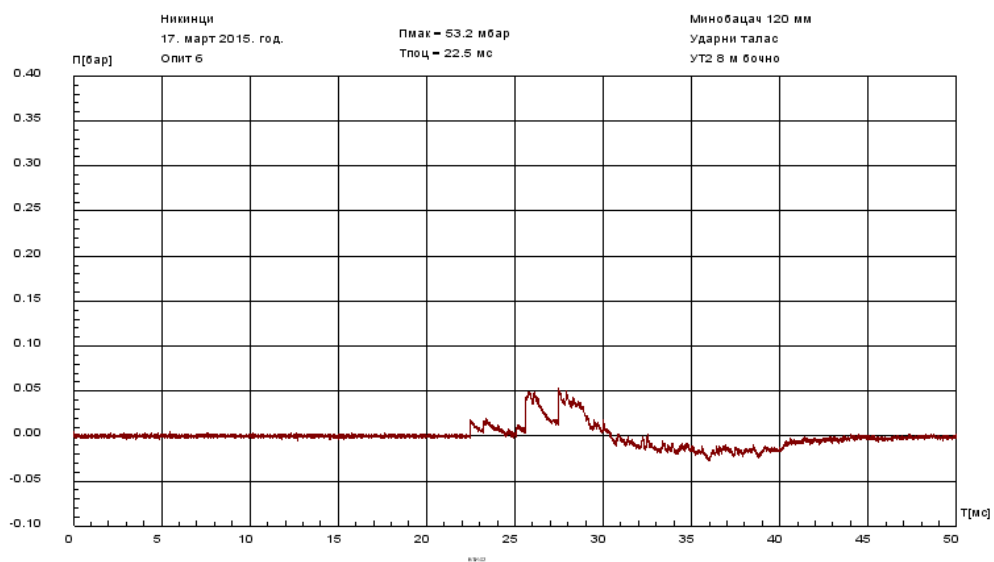
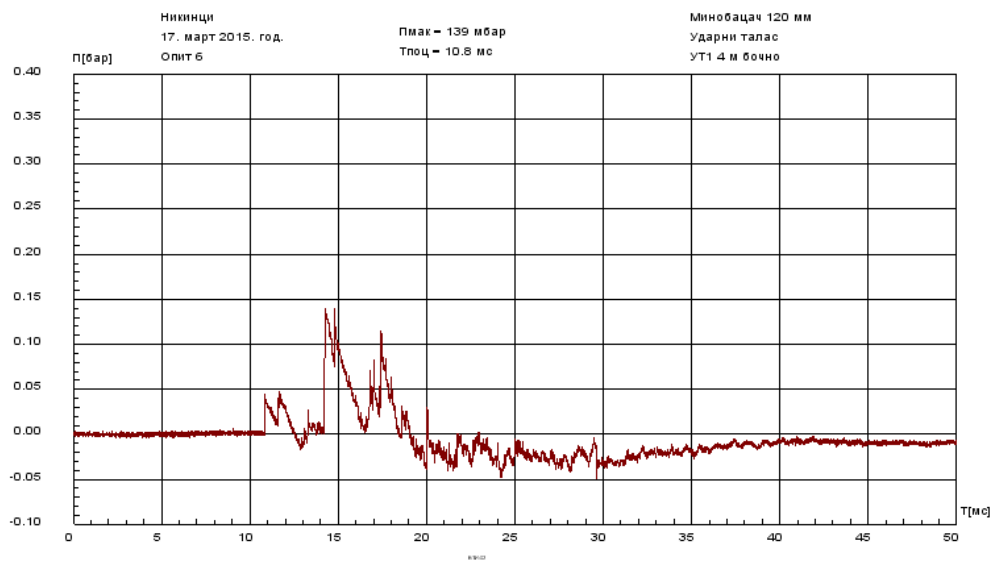
Obreda izvršena po programu UT/MFB

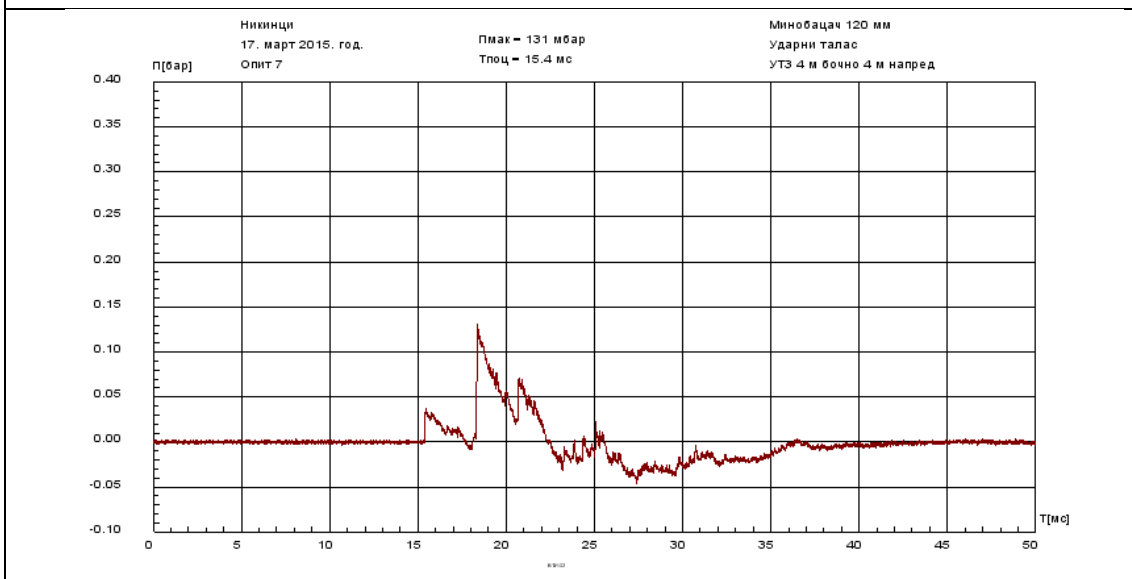
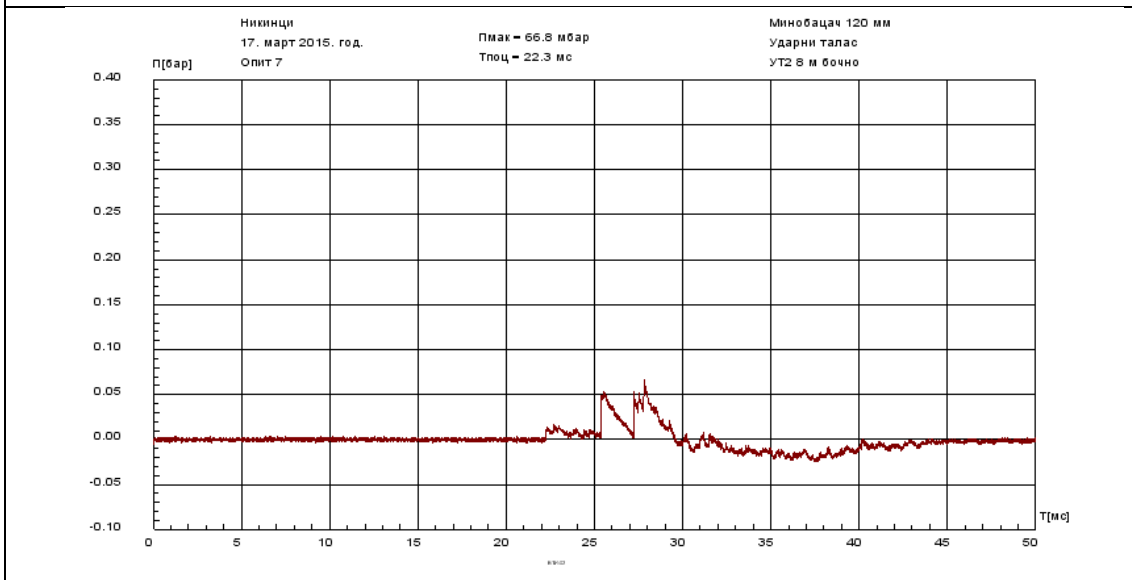
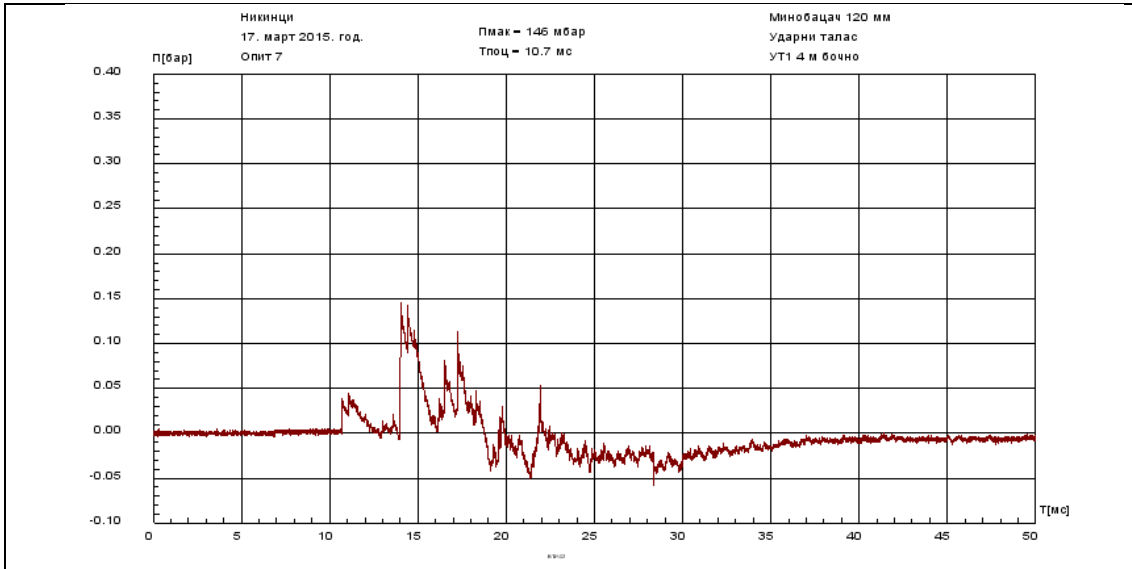


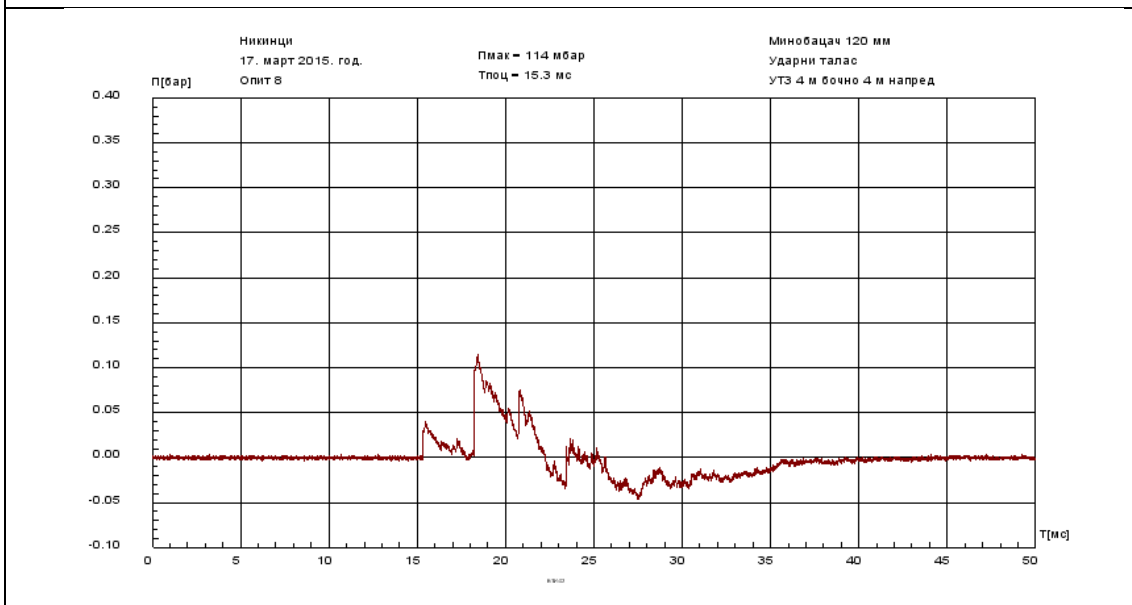
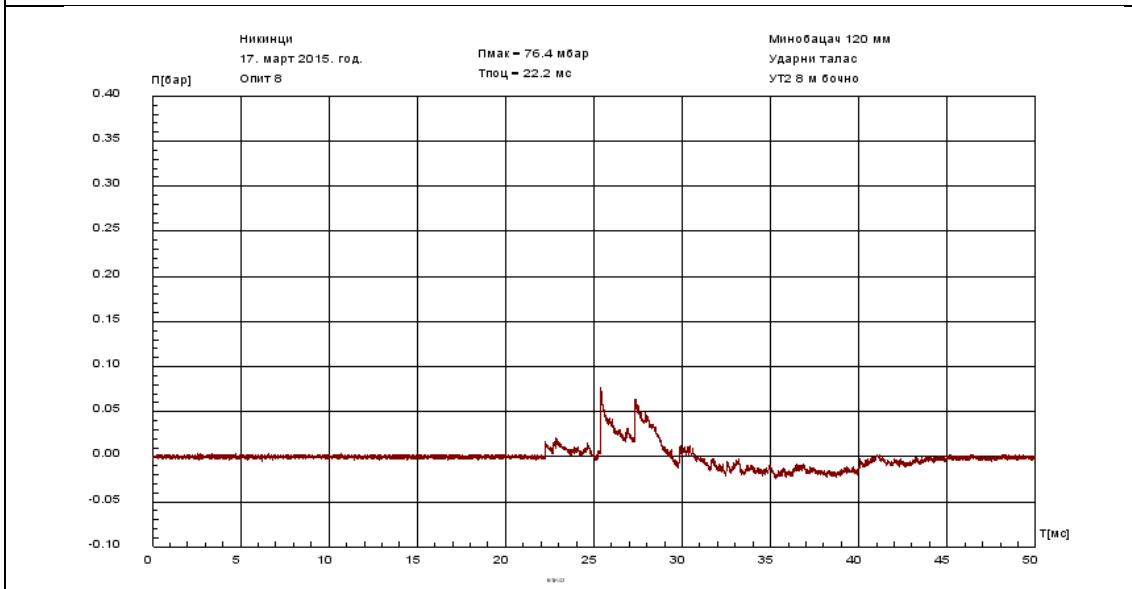
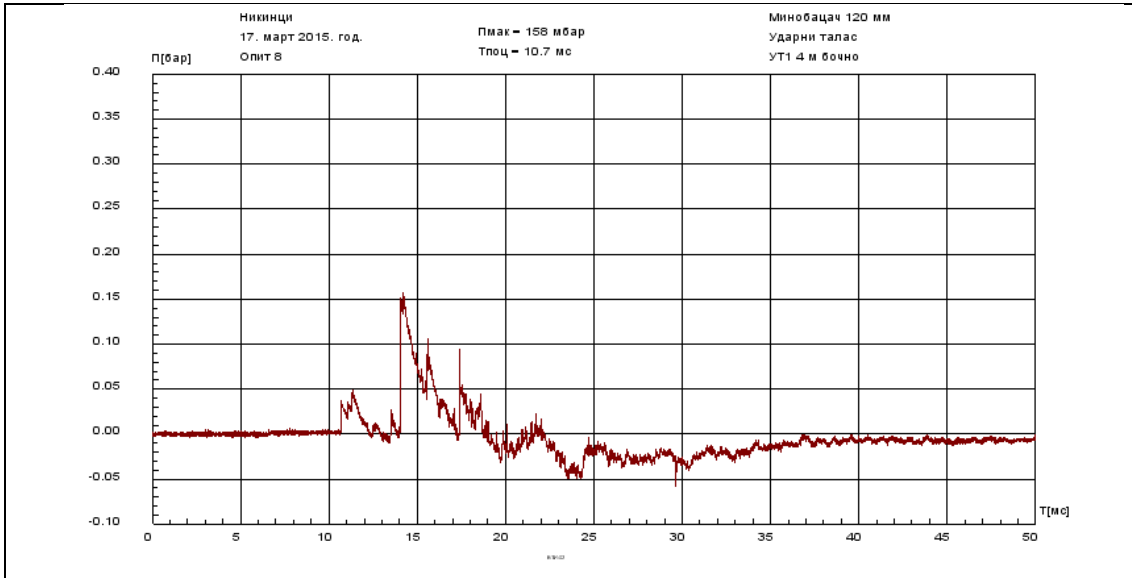
Obrađena izvršena po programu UT/M8B

*Прилог 2.5 – Графици натпритиска опаљење из МБ М75 са мином 120mm
ЛТФ М62П6, (0+6) и синхронизованом временском базом мерења*









Прилог 3 – Унутрашњебалистички прорачуни

(УБ ПРОРАЧУН 3.1)

УБ ПРОРАЧУН МИНОБАЦАЧА УПРОШЋЕНОМ МЕТОДОМ СЕРЕБРЈАКОВ

ОРУДЈЕ: МИНОВАСАС 120 mm M75 ПРОЈЕКТИЛ: МИНА 120 mm M62P3

ВАРУТ ОР : NGB-161 за О.Р. ВАРУТ ДР : NGB-261 за Д.Р.

ПУНЈЕНЈЕ : БАРУТНО ПУНЈЕНЈЕ (0+6)

РЕЗУЛТАТИ УБ ПРОРАЧУНА

=====

ПРВИ ПЕРИОД

Z	PSI	Y	L	V	P	VREME
-	-	-	(dm)	(m/s)	(bar)	(s)
0.05	0.06	0.0005	0.029	9.39	210.	0.00070
0.10	0.12	0.0010	0.085	18.77	311.	0.00115
0.15	0.18	0.0015	0.154	28.16	404.	0.00141
0.20	0.23	0.0021	0.230	37.55	489.	0.00168
0.25	0.29	0.0026	0.314	46.93	564.	0.00184
0.30	0.34	0.0031	0.404	56.32	632.	0.00205
0.35	0.40	0.0036	0.500	65.71	692.	0.00218
0.40	0.45	0.0041	0.602	75.10	744.	0.00236
0.45	0.50	0.0046	0.709	84.48	789.	0.00246
0.50	0.55	0.0052	0.824	93.87	828.	0.00262
0.55	0.60	0.0057	0.945	103.26	860.	0.00271
0.60	0.65	0.0062	1.073	112.64	886.	0.00286
0.65	0.70	0.0067	1.208	122.03	906.	0.00294
0.70	0.74	0.0072	1.351	131.42	921.	0.00309
0.75	0.79	0.0077	1.503	140.80	931.	0.00316
0.80	0.83	0.0082	1.664	150.19	936.	0.00331
0.85	0.88	0.0088	1.834	159.58	938.	0.00339
0.90	0.92	0.0093	2.015	168.97	935.	0.00353
0.95	0.96	0.0098	2.207	178.35	929.	0.00361
1.00	1.00	0.0103	2.412	187.74	919.	0.00375

ДРУГИ ПЕРИОД

Y	L	V	P	VREME
-	(dm)	(m/s)	(bar)	(s)
0.011	2.941	207.74	804.	0.00398
0.013	3.611	227.74	694.	0.00433
0.014	4.466	247.74	588.	0.00465
0.015	5.571	267.74	489.	0.00512
0.016	7.019	287.74	398.	0.00560
0.017	8.948	307.74	316.	0.00628
0.018	10.850	322.76	262.	0.00687

МАКСИМАЛНИ ПРИТИСАК ЈЕ: Pm(Pr) = 938 бара, Pm(Kr) = 860 бара

ПОСЕТНА БРЗИНА ЈЕ: Vo = 322.7 m/s

(УБ ПРОРАЧУН 3.2)

УБ ПРОРАЧУН МИНОБАЦАЧА УПРОШЋЕНОМ МЕТОДОМ СЕРЕБРЈАКОВ

ОРУДЈЕ: МИНОВАСАС 120 mm M95 ПРОЈЕКТИЛ: МИНА 120 mm M62P3

BARUT OP : NGB-161 za O.P. BARUT DP : NGB-261 za D.P.

PUNJENJE : BARUTNO PUNJENJE (0+7)

РЕЗУЛТАТИ УБ ПРОРАЧУНА

PRVI PERIOD

Z	PSI	Y	L	V	P	VREME
-	-	-	(dm)	(m/s)	(bar)	(s)
0.05	0.06	0.0005	0.027	9.39	233.	0.00066
0.10	0.12	0.0010	0.076	18.77	356.	0.00105
0.15	0.18	0.0015	0.136	28.16	469.	0.00128
0.20	0.23	0.0021	0.201	37.55	574.	0.00151
0.25	0.29	0.0026	0.272	46.93	669.	0.00165
0.30	0.34	0.0031	0.347	56.32	756.	0.00182
0.35	0.40	0.0036	0.427	65.71	834.	0.00192
0.40	0.45	0.0041	0.511	75.10	904.	0.00207
0.45	0.50	0.0046	0.599	84.48	966.	0.00215
0.50	0.55	0.0052	0.691	93.87	1021.	0.00229
0.55	0.60	0.0057	0.789	103.26	1068.	0.00236
0.60	0.65	0.0062	0.891	112.64	1109.	0.00248
0.65	0.70	0.0067	0.998	122.03	1143.	0.00254
0.70	0.74	0.0072	1.111	131.42	1171.	0.00266
0.75	0.79	0.0077	1.229	140.80	1193.	0.00272
0.80	0.83	0.0082	1.353	150.19	1210.	0.00283
0.85	0.88	0.0088	1.484	159.58	1221.	0.00289
0.90	0.92	0.0093	1.621	168.97	1227.	0.00300
0.95	0.96	0.0098	1.766	178.35	1229.	0.00305
1.00	1.00	0.0103	1.919	187.74	1226.	0.00317

DRUGI PERIOD

Y	L	V	P	VREME
-	(dm)	(m/s)	(bar)	(s)
0.011	2.312	207.74	1096.	0.00334
0.013	2.798	227.74	967.	0.00359
0.014	3.403	247.74	842.	0.00381
0.015	4.164	267.74	721.	0.00414
0.016	5.129	287.74	607.	0.00445
0.017	6.368	307.74	503.	0.00490
0.018	7.982	327.74	408.	0.00538
0.019	10.121	347.74	324.	0.00604
0.020	13.011	367.74	251.	0.00682
0.020	13.850	372.40	235.	0.00704

МАКСИМАЛНИ ПРИТИСАК ЈЕ: Pm(Pr) =1229 Bar - Pm(Kr) =1137 bar

ПОСЕТНА БРЗИНА ЈЕ: Vo =372.4 m/s

(УБ ПРОРАЧУН 3.3)

УБ ПРОРАЧУН МИНОБАЦАЧА УПРОШЋЕНОМ МЕТОДОМ СЕРЕБРЈАКОВ

ОРУДЈЕ: МИНОВАСАС 120 mm M95 ПРОЈЕКТИЛ: МИНА 120 mm M95
БАРУТ ОР: NGB-161/A за О.Р. БАРУТ ДР: NGB-261/B за Д.Р.
ПУЊЕЊЕ: БАРУТНО ПУЊЕЊЕ (0+10)

РЕЗУЛТАТИ УБ ПРОРАЧУНА

ПРВИ ПЕРИОД

Z	PSI	Y	L	V	P	VREME
-	-	-	(dm)	(m/s)	(bar)	(s)
0.05	0.06	0.0002	0.029	9.49	279.	0.00070
0.10	0.12	0.0004	0.081	18.97	431.	0.00112
0.15	0.18	0.0005	0.143	28.46	574.	0.00135
0.20	0.23	0.0007	0.211	37.95	707.	0.00159
0.25	0.29	0.0009	0.284	47.43	832.	0.00173
0.30	0.34	0.0011	0.361	56.92	948.	0.00191
0.35	0.40	0.0013	0.441	66.41	1055.	0.00200
0.40	0.45	0.0014	0.525	75.90	1153.	0.00215
0.45	0.50	0.0016	0.612	85.38	1243.	0.00223
0.50	0.55	0.0018	0.703	94.87	1325.	0.00236
0.55	0.60	0.0020	0.798	104.36	1399.	0.00243
0.60	0.65	0.0022	0.896	113.84	1466.	0.00255
0.65	0.70	0.0023	0.999	123.33	1525.	0.00260
0.70	0.74	0.0025	1.105	132.82	1577.	0.00272
0.75	0.79	0.0027	1.216	142.30	1622.	0.00277
0.80	0.83	0.0029	1.331	151.79	1661.	0.00288
0.85	0.88	0.0031	1.451	161.28	1693.	0.00292
0.90	0.92	0.0032	1.576	170.76	1719.	0.00303
0.95	0.96	0.0034	1.706	180.25	1739.	0.00307
1.00	1.00	0.0036	1.842	189.74	1754.	0.00318

ДРУГИ ПЕРИОД

Y	L	V	P	VREME
-	(dm)	(m/s)	(bar)	(s)
0.004	2.176	209.74	1615.	0.00331
0.004	2.578	229.74	1473.	0.00353
0.005	3.061	249.74	1331.	0.00370
0.005	3.644	269.74	1190.	0.00395
0.005	4.349	289.74	1052.	0.00417
0.006	5.209	309.74	919.	0.00449
0.006	6.266	329.74	793.	0.00479
0.007	7.576	349.74	676.	0.00521
0.007	9.216	369.74	567.	0.00563
0.007	11.295	389.74	469.	0.00621
0.008	12.700	400.81	419.	0.00655

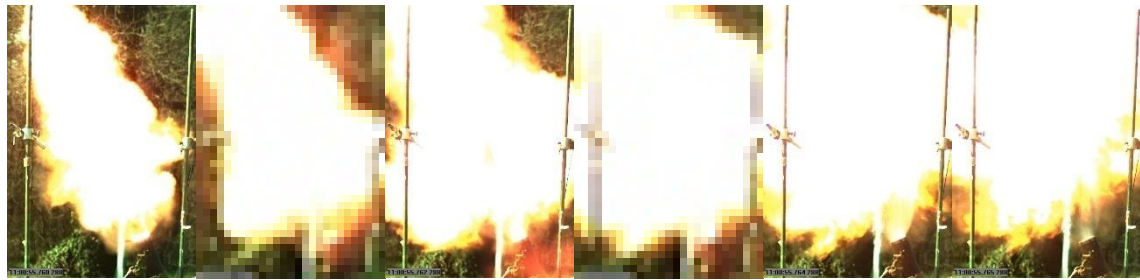
МАКСИМАЛНИ ПРИСАК ЈЕ: $P_m(Pr) = 1754. \text{ bar}$, $P_m(Kr) = 1400. \text{ bar}$

ПОСЕТНА БРЗИНА ЈЕ: $V_o = 400.8 \text{ m/s}$

Прилог 4 – Снимци опаљења из МБ 120 mm М95



0.000 0.001 0.002 0.003 0.004 0.005



0.006 0.007 0.008 0.009 0.010 0.011



0.012 0.013 0.014 0.015 0.016 0.017

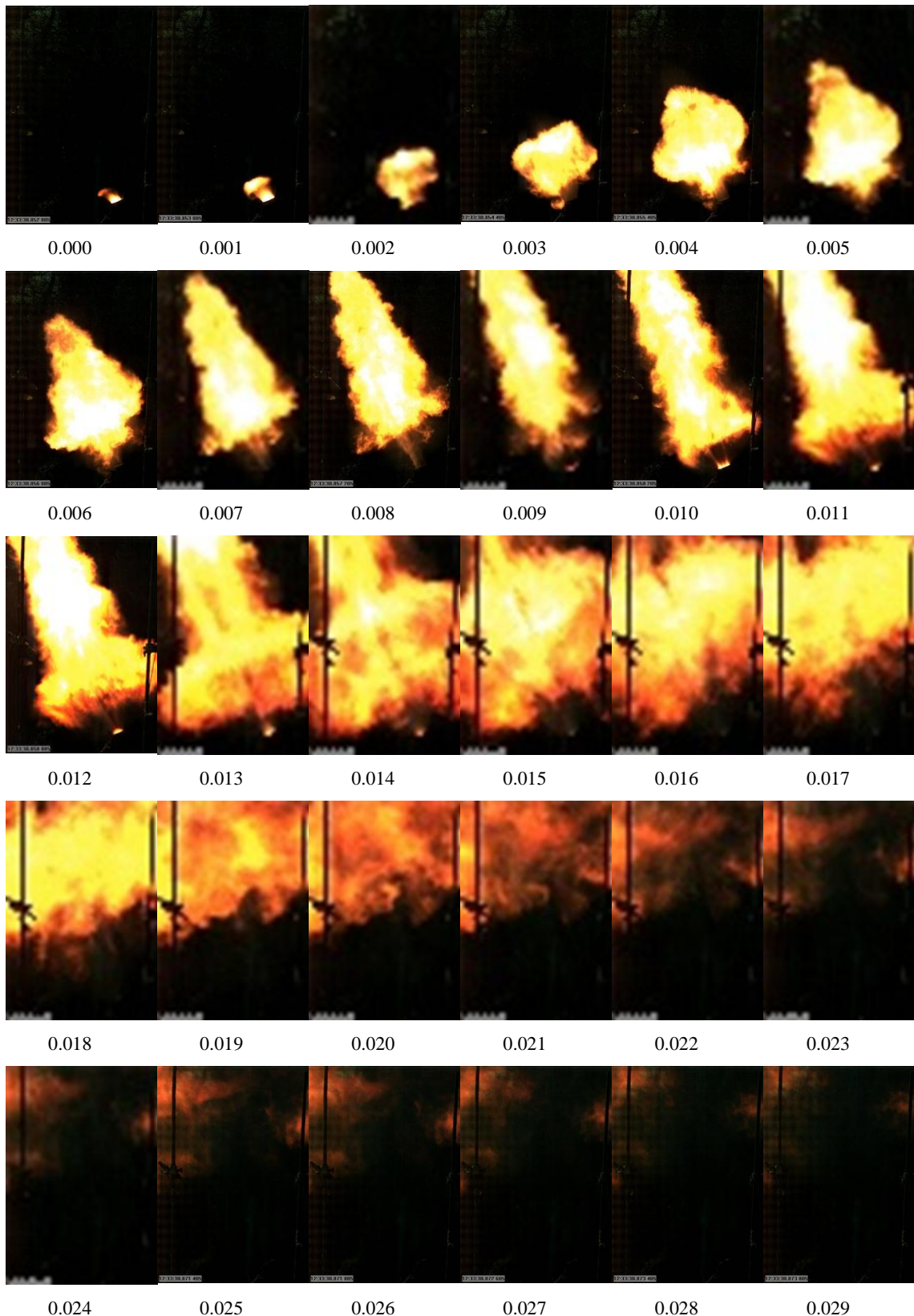


0.018 0.019 0.020 0.021 0.022 0.023



0.024 0.025 0.026 0.027 0.028 0.029

Снимци опаљења из МБ 120 mm М95 са ЛТФ мином 120 mm М62П6, (0+7) б/п, снимци су урађени брзом ТВ камером ФАНТОМ 2000, временски корак између снимака је 1ms



Снимци опаљења из МБ 120 мм М95 са мином 120 мм М62П6, (0+7) б/п, камера ФАНТОМ 2000, временски корак између снимака је 1ms, брзина снимања 5000 fps

БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ АУТОРА

Миодраг Лисов рођен је 17.06.1962 године у Подгорици. Основне студије уписао је на Машинском факултету у Београду 1982. године. Дипломирао је на групи за термотехнику, 1987 године, са оценом 10 (десет), тема дипломског рада била је: "Одређивање расхладног и грејног учинка уређаја за хлађење мобилних средстава". Запослен је у Војнотехничком институту, где ради од 1988. године. У току рада у Војнотехничком институту обављао је дужности самосталног и вишег истраживача, у Секторима за ракетно и класично наоружање, а затим је вршио дужност начелника Одсека балистике, начелника Одељења балистике и муниције и начелника Сектора за класично наоружање и возила. Тренутно се налази на месту помоћника директора за научноистраживачки рад, официр је Војске Србије са чином пуковника.

У току своје каријере учествовао је у реализацији већег броја истраживачких и развојних пројеката, који су за резултат имали увођење више средстава у наоружање и опрему Војске Србије.

Магистрске студије је уписао у Центру за мултидисциплинарне студије, Универзитета у Београду, а магистарски рад "Оцена могућности примене нових материјала за израду водећег прстена артиљеријских пројектила" одбранио је 2006. године и стекао академско звање магистар наука.

На III годину докторских студија, на Машинском факултету, Универзитета у Београду, област војно машинство, катедра за Системе наоружања, уписао се 2016. године.

Аутор и коаутор је више радова који су саопштени и публиковани на научним скуповима и часописима везаним за област наоружања и војне опреме ("ЈКЕМ"- Југословенски комитет за експлозивне материје, "ОТЕХ"- Научни скуп одбрамбене технологије и "Scientific Technical Review", "НТП"- Научнотехнички преглед, Technical Gazette). У својству председника научног одбора, учествовао је у организацији и раду 7. Међународног скупа о одбрамбеним технологијама "ОТЕХ 2016" у Београду.