

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**

**Војна академија
Универзитета одбране у Београду**



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Предмет: Унутрашњебалистичко пројектовање

Број индекса: 330/2019

Ђорђе Р. Кокерић

Оптимизација унутрашњебалистичких параметара у фази пројектовања цеви топ-хаубице 155 mm

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Пп доцент др Небојша Христов - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: Војноиндустријско инжењерство

Студијско подручје (усмерење): Општи смер

Име и презиме: Ђорђе Кокерић

Број индекса: 531/2015

ПРИЈАВА МАСТЕР РАДА

Тема рада: **Оптимизација унутрашњебалистичких параметара у фази пројектовања цеви топ-хаунице 155 mm**

Задатак: Примарни задатак мастер рада је дефинисање процедура пројектовања цеви топ-хаунице 155 mm. Кроз мастер рад треба да се презентују табличне методе пројектовања и упоређивање са нумеричким прорачуном балистичких параметара и елемената цеви. Кандидат треба да изврши оптимизацију полазних параметара првенствено кроз варирање балистичких карактеристика погонског пуњења. Кандидат треба да на основу елемената пројектила изврши спољнобалистички прорачун елемената лета пројектила са основним и оптимизованим елементима УБ параметара и да одговарајућа поређења са каталошким вредностима таблица гађања, као и да да оцену параметара прецизности. Овим радом кандидат треба првенствено да презентује методолошки приступ оптимизације УБ параметара код пројектовања цеви за било који систем класичног наоружања.

Ментор:

Крагујевац, 09.09.2020.

пп доцент др Небојша Христов, дипл.инж.

Резиме

У оквиру овог рада презентоване су таблична и аналитичка метода унутрашњебалистичког пројектовања са оптимизацијом улазних параметара, као и прорачун лета за пројектил 155 mm. Оптимизацијом улазних балистичких параметара применом аналитичке методе, добијено је оптимално решење за повећање домета на основу повећане почетне брзине пројектила. На одабраном оптималном решењу извршен је прорачун елемената лета пројектила. На крају је извршено поређење добијених резултата са подацима из таблица гађања.

Кључне речи: пројектил, аналитичка метода, унутрашње балистички прорачун, елементи лета, вероватно одступање

Abstract

Within this paper, the tabular and analytical method of internal ballistic design with optimization of input parameters, as well as the flight calculation for a 155 mm projectile are presented. By optimizing the input ballistic parameters by applying the analytical method, an optimal solution for increasing the range based on the increased initial velocity of the projectile was obtained. The calculation of the flight elements of the projectile was performed on the selected optimal solution. Finally, the obtained results were compared with the data from the shooting tables.

Keywords: projectile, analytical method, internal ballistic calculation, flight elements, probable deviation

Садржај

1. Увод.....	5
2. Историјски развој	6
2.1. Нора Б-52 155 mm	7
2.2. Тактичко-технички захтеви и карактеристике оруђа.....	11
2.2.1. Борбени захтеви	11
2.2.2. Захтеви послуживања.....	13
2.2.3. Производно-економски захтеви.....	14
3. Аналитичко-таблична метода унутрашњобалистичког пројектовања	15
3.1. Метода Слухоцког.....	15
3.2. Пројектовање оруђа калибра 155 mm.....	19
4. Аналитички модел унутрашњобалистичког прорачуна	22
4.1. Метода Дроздова	22
4.2. Варирање улазних параметара у фази оптимизације.....	25
4.2.1. Варирање запремине барутне коморе.....	25
4.2.2. Варирања масе пројектила	27
4.2.3. Варирање дужине водишта пројектила	30
4.2.4. Варирање масе барута	32
4.2.5. Варирање зависних компоненти.....	34
4.3. Оптимално решење	36
5. Прорачун елемената лета пројектила.....	37
5.1. Модел пројектила	37
5.2. Одређивање аеродинамичких коефицијената	38
5.3. Одређивање елемената путање	43
5.4. Прорачун мерила прецизности	46
6. Закључак	52
Литература	53

1. Увод

Савремено ратовање и локални сукоби широм света довели су до међународних споразума о ограничавању поседовања оружја за масовно уништавање и захтева за успостављањем нуклеарне равнотеже. Тако је дошло и до поновног развоја и усавршавања постојећих артиљеријских оруђа.

Кад се каже унутрашњобалистичко пројектовање подразумева се одређивање оптималних конструктивних карактеристика цеви, услова пуњења и енергетских карактеристика погонског пуњења на основу захтева који се постављају пред оруђе.

У овом раду ће бити одрађен класични задатак унутрашњобалистичког пројектовања. За њега је потребно знати калибар цеви, масу пројектила и његову почетну брзину. На основу њих се одређује водиште пројектила, модел и тип барута, као и све податке неопходне за прорачун цеви, пројектила и лафета. Класичан задатак може да се реши табличним и аналитичким методама, а у раду ће се одрадити аналитичка метода Слухоцког. Након тога треба одрадити унутрашњобалистички прорачун методом Дроздова.

Циљ рада је пронаћи такве вредности параметара, да укупан импулс силе барутних гасова буде што мањи, односно притисак барутних гасова у цеви, а да почетна брзина пројектила буде што већа. Ова два захтева су контрадикторна, зато што се смањивањем притиска барутних гасова у цеви смањује и брзина пројектила на устима цеви, тако да се тражи одређени компромис тј. оптимално решење које ће имати што већу почетну брзину, уз најмање могуће нарушавање излазних величина као што је импулс трзаја оруђа и сл.

По одређивању оптималног решења потребно је одрадити прорачун за елементе лета пројектила. Ти добијени подаци ће се на крају упоредити са вредностима из таблица гађања и на основу тог поређења дати закључци о оптималном решењу.

2. Историјски развој

Развој артиљеријских оруђа фамилије „Нора“ започет је давне 1976. године у Војнотехничком институту Копнене војске ЈНА. Програм Нора је обухватао развој више типова основног оруђа артиљерије и то: вучена топ-хаубица Нора-А, самоходна топ-хаубица Нора-Б и самопокретна топ-хаубица Нора-Ц. У наоружање ЈНА уведена је само вучена топ-хаубица 152 mm М84 (Нора-А), а до 1992. настављен је развој оруђа Нора-Б и Нора-Ц. После вишегодишњег прекида рада, 2003. године настављен је развој оруђа Нора-Б, а затим и серијска производња система самоходног оруђа 155 mm Нора-Б52 за потребе Војске Србије и извоза страном купцу (пројекат је финансирао и стручно водио „Југоимпорт-СДПР“) [1].

Средином седамдесетих година прошлог века започет је рад на пројекту „Нора“ са следећим тенденцијама развоја: смањивање броја калибара (основно оруђе подршке да буде калибар 152 mm или 155 mm) и наглашени тактички захтеви да се повећа дomet (нови тип муниције, повећа покретљивост и маневар). Тако се у оквиру овог пројекта развила три модела оруђа калибра 152 mm:

- вучена топ-хаубица 152 mm Нора-А (цев дужине 39 калибара)
- самоходни топ 152 mm Нора-Б (цев дужине 45 калибара)
- самопокретни топ 152 mm Нора-Ц (цев дужине 45 калибара)

Вучена топ-хаубица Нора-А је развијена поступком модернизације руског топа 152 mm D-20. Након извршених завршних испитивања уведена је у оперативну употребу војске ЈНА 1984. године као модел М84. Тако је усвојена серијска производња артиљеријског система друге генерације [1].

Од 1983. године развијан је конвертовани топ 155 mm М46/84 (за извоз), а током 1986. године у наоружање је усвојен топ 152 mm М46/86 уз прекалибрацију цеви на калибар 152 mm. Тако се овладало балистичким решењем артиљеријских оруђа треће генерације, са цевима дужине 45 калибара (155 mm), односно 46 калибара (152 mm).

У току 1984. године настављен је програм „Нора“ развојем самопокретног топа 152 mm Нора-Ц. Коришћењем оруђа 152 mm Нора-А реализован је функционални модел оруђа Нора-Ц1. У другој фази развоја оруђе Нора-Ц1 је преведено у оруђе Нора-Ц2, на којем су била извршена истраживања могућих решења полуатуматских потискивача пројектила и покретања цеви оруђа по висини. Након завршетка испитивања, 1987. године приступило се развоју и изради самопокретног оруђа Нора-Ц3 великог дometа, коришћењем усвојеног балистичког решења конвертованог топа 152 mm М46/84. Крајем 1989. године завршена је израда и испитивање оруђа, али се развој овог система није наставио због смањеног буџета [1].

Развој последњег оруђа у овом програму, самоходне топ-хаубице 152 mm Нора-Б био је инициран потребом да се у формацијама механизованих јединица уведу самоходна артиљеријска оруђа повећане покретљивости. У анализи израђеној 1984. године разматране су 3 варијанте:

- самоходни топ са куполом уграђеном на шасију тенка М84,
- самоходни топ са куполом уграђеном на шасију новопроектваног теренског аутомобила формуле 8x8 и
- самоходни топ са „отвореном“ уградњом (без куполе) наоружања на платформу точкашког возила ФАП 2832 формуле 8x8.

Усвојена је трећа варијанта која је била најприхватљивија са гледишта цена-ефикасност. Друга варијанта била би скупља за два пута од треће, а прва за око четири пута. При дефинисању самоходног оруђа водило се рачуна да се максимално искористе искуства и резултати претходног развоја, па је стога усвојено да оруђе има идентично основно наоружање као оруђе Нора-ЦЗ (склоп цеви 155 mm, дужине 46 калибара), са могућношћу да се конвертује у калибар 155 mm. Током 1991. године извршене се конструкторске припреме за уградњу цеви 155 mm, дужине 45 калибара [1].

Након укидања санкција, половином 2002. године „Југоимпорт-СДПР“ је закључио уговор са купцем из југоисточне Азије за продају самоходног оруђа 155 mm Нора-Б52 четврте генерације, чији домет треба да буде 41 km.

2.1. Нора Б-52 155 mm

Нора Б-52 је самоходна хаубица. Настала је услед потребе за новом, брзом и покретном хаубицом која ће заменити постојеће. Конструисана је на основу прекалибрисаног топа 130 mm М46 са новим калибром 155 mm, монтираног на камион КамАЗ-6560 или ФАП 2632 са погоном 8x8.

Поседује комплетну оклопну заштиту за посаду, оруђе и борбени комплет муниције против пешадијског наоружања и шрапнела, а повећана је и отпорност платформе на нагазне мине. Веома битне чињенице су повећање степена заштите резервоара за гориво и складишта за муницију – две критичне тачке сваког оклопног возила, укључујући ту и тенкове.

Након вишегодишњег развоја и тестирања, 2006. почела је активна производња хаубице. Србија је такође исказала намеру да извози самоходну хаубицу Нора Б-52 (слика 2.1) у Европу приликом њеног представљања на сајму оружја „Партнер 2009“ у Београду.



Слика 2.1. Самоходна топ-хаубица 155 mm Нора Б-52 [3]

Комплет самоходне топ-хаубице 155 mm „Нора Б-52" састоји се из [2]:

- подсистема наоружања
- подсистема модификованог теренског возила
- подсистема хидраулике са припадајућим хидропнеуматским подсистемима
- подсистема пнеуматске инсталације затварача
- подсистема електроенергетике
- подсистема за управљање ватром (СУВ) на оруђу
- противпожарног система
- подсистема за вентилацију, климатизацију и грејање
- подсистем везе између чланова посаде
- помоћног агрегата (мотора и пумпе)

Концепција решења самоходног оруђа Нора-Б52 (уградња наоружања на шасију теренског возила конфигурације 8x8) и габаритне димензије оруђа обезбеђују [2]:

- добру проходност оруђа ван путева и на путевима
- превозење послуге оруђа
- превозење 0,5 борбеног комплекта (б/к) муниције за основно наоружање (12 пројектила и 12 барутних пуњења у аутоматском пуњачу и 24 пројектила и 24 барутних пуњења у муницијским контејнерима на оруђу). Превозење осталих 0,5 б/к муниције се врши у возилима за превоз и претовар муниције (логистичка возила. Три логистичка возила, на нивоу батерије, превозе по 72 пројектила и по 72 барутна пуњења. На сваком оруђу се превози и по један б/к муниције за допунско наоружање
- безбедан рад послуге при опслуживању оруђа на ватреном положају
- балистичку заштиту послуге, делова склопа наоружања и возила од метка 7,62x39 mm и парчади ариљеријског пројектила 155 mm
- безбедно напуштање бојишта у случају квара основног хидро-електричног система уз помоћ резервних подсистема уграђених на возило
- три мода рада (аутоматски, полуаутоматски и ручни)

Самоходно оруђе Нора Б-52 испуњава следеће захтеве покретљивости и проходности [2]:

- највећа брзина по равном асфалтном путу $\geq 80 \text{ km/h}$
- највећа брзина по равном макадамском путу $\geq 40 \text{ km/h}$
- ров ширине $\geq 1600 \text{ mm}$
- највећи уздужни нагиб $\geq 50\%$
- највећи попречни нагиб $\geq 20\%$
- аутономија кретања по равном путу до 500 km
- дубина воденог газа $\geq 1 \text{ m}$
- висина вертикалне препреке $\geq 0,5 \text{ m}$
- минимални радијус окрета $\leq 16,6 \text{ m}$
- пређени пут са оштећеним пнеуматичима до 50 km

Самоходно оруђе Нора-Б52 треба да има следеће наоружање [2]:

- основно наоружање: топ 155 mm са цеви дужине 52 калибара, уграђен у куполу (делимично оклопљен) на модификовану основу теренског аутомобила
- помоћно наоружање: митраљез 12,7 mm са турелом
- бацачи димних кутија (две групе по два бацача 82 mm уграђене на предњи део кабине возила)
- наоружање за обуку: спрегнути топ 20 mm M55

Употреба самоходног оруђа Нора-Б52 је обезбеђена, без деградирања експлоатационих карактеристика, у следећим условима [2]:

- на свим врстама терена;
- при климомеханичким условима (сунце, киша, снег, висока влажност, висока концентрација песка)
- дању и ноћу, при свим условима видљивости;
- рад основних подсистема оруђа је поуздан у температурном опсегу -25°C до +55°C;
- у случају отказа рада основног мотора, додатни агрегат који је уграђен на оруђе, обезбеђује несметан рад свих извршних органа;
- у случају отказа електро-енергетског подсистема, преко уграђених блокова и вентила на оруђу, обезбеђује се извршење основних функције у циљу напуштања ватреног положаја;
- оруђе има уграђен независни, резервни, ручни хидраулични подсистем који ће обезбедити превођење оруђа из борбеног у маршевски положај ради повлачења са ватреног положаја.

Борбена маса оруђа Нора-Б52 са 0,5 б/к и члановима посаде није већа од 36 t. Број чланова посаде самоходног оруђа Нора Б-52 је 5 (командир, нишанција, возач и 2 послуживоца). Међусобна комуникација посаде омогућена је уређајем УМК којим могу вршити несметану комуникацију на радним местима као и на местима попуне компоненти аутоматског пуњача. УМК је интегрисан у систем везе на нивоу оруђа и батерије. На самоходном оруђу Нора-Б52 је интегрисан део система за управљање ватром, који, заједно са системом за управљање ватром на нивоу батерије и дивизиона омогућава ефикасно коришћење оруђа. Систем за управљање ватром на нивоу батерије омогућава коришћење оруђа на неколико начина: у аутоматском (аутоматска нишанска линија), полуаутоматском и класичном (ручном) режиму рада.

Део система за управљање ватром сањичавају [2]:

- уређај за инерцијално навођење, оријентацију и усмеравање у основни правац
- уређај за одређивање позиције оруђа у простору
- средства везе
- уређај за међусобну комуникацију посаде;
- PLC уређај;
- Показивачи елемената гађања и осталих информација са рачунима
- комплет нишанских справа за посредно и непосредно гађање са прибором за осветљавање истих;
- колиматор за свако оруђе за обележавање основног правца у класичном – ручном режиму рада

У табели 2.1 приказане су основне карактеристике оруђа.

Табела 2.1. *Тактичко-техничке карактеристике Норе Б-52 [3]*

Нора Б-52	Србија
Калибар	155 [mm]
Максимални домет	41[Km]
Брзина паљбе	6 [у минути]
Елевација	-3° +70°
Посада	4
Брзина возила на путу	90 [Km/h]
Маса пројектила	43,56 [kg]
Маса максималног барутног пуњења	11,9 [kg]
Почетна брзина пројектила	826 [m/s]
Дужина цеви	52 калибара

2.2. Тактичко-технички захтеви и карактеристике оруђа

Савремено артиљеријско оруђе представља сложену борбену машину, која у зависности од борбене намене по конструкцији и спољном изгледу може бити врло разноврсна. Без обзира на то, принцип рада готово свих артиљеријских оруђа је исти. Он је заснован на коришћењу енергије сагоревања барутног пуњења у цеви оруђа за време процеса опаљења. Развоју новог артиљеријског оруђа без обзира на тип или врсту увек претходи разрада тактичко-техничких захтева којима се дефинишу најважније карактеристике и перформансе ових захтева зависи да ли ће основне карактеристике пројектованог оруђа одговарати условима савремене борбе. Тактичко-технички захтеви оруђа такође служе за упоредну оцену постојећих решења оруђа истог или различитог калибра у погледу квалитета и његове ефикасности. Ови захтеви се обично деле на борбену захтеве, захтеве послуживања и производно-економске захтеве [3].

2.2.1. Борбени захтеви

Борбени захтеви се односе на моћ, маневар и издржљивост. Моћ оруђа обухвата дејство пројектила на циљу, максимални домет, прецизност и тачност гађања и брзину гађања. Под појмом маневар подразумевају се: покретљивост оруђа, маневар ватром и маневар путањом. Издржљивост оруђа је могућност очувања борбене особине оруђа у различитим условима експлоатације.

Дејство пројектила на циљу

За гађање различитих циљева користе се различите врсте пројектила. Дејство свих врста пројектила на циљу одређује се величинама које карактеришу његов стварни учинак на циљу. Тако се дејство пројектила на оклоп одређује дебљином пробијања оклопа. Разорно

дејство пројектила мери се пречником левка, који се образује у земљи у тренутку експлозије, а ударно дејство – дебљином пробијања препреке. Учинак парчадног дејства пројектила зависи од броја убојних парчади на одређеној удаљености од места распрскавања пројектила [3].

Према захтеваном дејству пројектила на циљу одређују се калибар и врста оруђа, врста и почетна брзина пројектила.

Максимални домет

За меру максималног домета узима се највећа хоризонтална даљина гађања оруђа. Максималним дометом се обезбеђује гађање циљева на великим даљинама са довољно великом вероватноћом погађања и довољно ефикасним дејством на циљу. Осим тога, максимални домет омогућује маневар путањама без промене ватреног положаја, што је веома важно за маскирање оруђа и изненадно отварање ватре. Максимални домет повећава се повећањем енергије пројектила на устима цеви. Повећање највећег домета постиже се такође смањењем отпора који се јавља при лету пројектила кроз ваздух до циља. Велики утицај на максимални домет има стабилност пројектила на путањи која се постиже саопштавањем пројектилу одговарајуће угаоне брзине. Да би се постигао максимални домет, цев оруђа мора да лансира пројектил са одређеним угловима елевације (нагиба у вертикалној равни гађања) [3].

Прецизност и тачност гађања

Прецизност оружја и муниције карактерише се величином слике погодака, тј. величином површине на којој су распоређени погоци у односу на средњи погодак, добијени гађањем у истим условима [4].

Тачност гађања представља удаљеност средњег поготка слике растурања од нишанске тачке, односно од центра циља. Тачност гађања зависи од тачности нишанских справа и увежбаности и тачности рада послуге (нишанције) оруђа [3].

Брзина гађања

Брзине гађања се дефинише највећим бројем лансираних пројектила из цеви оруђа у јединици времена. Она има нарочиту важност при гађању покретних циљева. Повећање брзине гађања постиже се: Погодном комбинацијом склопова и делова оруђа, обезбеђењем највеће стабилности оруђа при опаљењу, аутоматизацијом рада специјалних механизма и уређаја који олакшавају пуњење и пражњење оруђа при гађању и др.

Маневар оруђа

Маневар оруђа подразумева покретљивост оруђа, односно брзину превозења и способност брзог премештања оруђа (брзог преласка из маршевског у борбени положај) и брзо преношење ватре са једног циља на други. Савремена оруђа омогућују неприкладност у праћењу циља и дејство на циљу. Покретљивост оруђа зависи од масе оруђа, проходности (вучне варијанте), заокретљивости, стабилности при кретању и способности савлађивање

препрека. Покретљивост се повећава пре свега рационалном конструкцијом лафета оруђа и смањивањем укупне масе оруђа (применом лаких материјала и композита).

Брзина преношења ватре са једног циља на други зависи пре свега од брзине усмеравања цеви у простору тј. Угловних заокрета цеви у обе равни гађања.

Издржљивост оруђа

Издржљивост оруђа представља својство оруђа да очува своје борбене особине у различитим условима употребе и за одређене време, а да се при том не наруше основни параметри оруђа. Основни фактори издржљивости су поузданост оруђа и трајност оруђа (животни век). Поузданост оруђа се дефинише вероватноћом безотказног рада оруђа у што дужем временском периоду без појава застоја у раду или недозвољеног одступања параметара оруђа у односу на пројектоване [3].

Животни век оруђа подразумева радни век самог оруђа и радни век (животни век цеви). Оцена радног века оруђа или цеви обично се изражава преко укупног броја испаљених пројектила у што дужем временском периоду, а да се сачувају балистичке карактеристике цеви (домет, прецизност и тачност).

Основни показатељи краја животног века цеви услед прекомерне истрошености и ерозије цеви су: пад почетну брзине, повећање калибра, смањење тачности гађања и повећање полупречника растурања погодака. Постоје различите методе и поступци за утврђивање техничке исправности цеви услед трошења и ерозије унутрашњости цеви, као и начини за квантитативно утврђивање и оцену укупног и преосталог животног века цеви.

2.2.2. Захтеви послуживања

Захтеви послуживања оруђа се огледају у следећем:

- безотказном раду свих механизма оруђа,
- безбедном руковању оруђем и
- једноставном и лако опслуживању.

Испуњење ових захтева омогућава послужу оруђа да без већих физичких напора извршава борбене задатке. Осим тога, ови захтеви се битно побољшавају тежњом да се што више радњи у надлежности послуге аутоматизује уз прихватљиво оптерећење човека у погледу делујућих притисака, убрзавања, вибрација, звука и др. за време опаљења

2.2.3. Производно-економски захтеви

Овом групом захтева се дефинишу услови и начин производње оруђа, као и економски показатељи пројектовања, производње и експлоатације оруђа. Тежи се оптималној конструкцији оруђа уз рационалну и прихватљиву цену коштања, која се може обезбедити у серијској производњи ослоном на развијене капацитете националне привреде.

Најважнији производно-економски захтеви су:

- једноставна конструкција и високопродуктивна технологија производње
- стандардизација и унификација што већег броја делова оруђа и међузаменљивост делова, што омогућује да се у ново оруђе уграђују већ усвојени делови, механизми и агрегати
- типизација лафета и нишанских справа
- коришћење домаћих материјала са високим механичким карактеристикама и примена нових материјала (лаких легура, композита и сл)

3. Аналитичко-таблична метода унутрашњебалистичког пројектовања

3.1. Метода Слухоцког

Метода Слухоцког има доста елемената табличних метода, тако да би се могла сврстати и у ту групу метода. Међутим, при прорачуну се користи доста израза из теорије, па је због те чињенице у овом раду стављена у групу аналитичких метода.

Као помоћно средство за извођење прорачуна, Слухоцки је израдио две табеле. У првој табели (табела 3.1) дата је веза између одређених параметара. Поред раније дефинисаних, овде се налазе и вредности за крешерни максимални притисак (p_{mkr}), који треба објаснити.

Из теорије унутрашње балистике познато је да је у одређеном моменту времена притисак иза пројектила дуж цеви различит. Прорачуно се одређује тзв. средњи притисак. Постоје релације између тог притиска и притиска на дно пројектила, односно на дно цеви. У моменту када се прорачуном добија средњи максимални притисак p_m на дно цеви, притисак је p_{mk} . На полигону се помоћу крешера мери тзв. максимални крешерни притисак (p_{mkr}) на дно цеви. Систематска грешка мерења износи око 12%, тако да важи [5]:

$$p_{mkr} = \frac{p_m}{1,12} \quad (3.1)$$

На основу везе између p_m и p_{mk} , може се написати релација:

$$p_m = \frac{1,12 \varphi p_{mkr}}{1,02 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m_b}{m} \frac{\lambda_u + \frac{1}{\lambda}}{\lambda_u + 1} \right)} \quad (3.2)$$

Табела 3.1. Веза између одређених параметара [5]

$10^{-7} K_c$ ($\frac{J}{m^3}$)	p_{mkr} (MPa)	ρ ($\frac{kg}{m^3}$)	χ	$10^{-4} K_{m_b}$ ($\frac{J}{m^3}$)	$\frac{L_c}{d}$
100	170	500	1,02	124	14
200	195	550	1,09	120	23
300	220	590	1,18	117	31
400	240	620	1,28	114	38
500	260	640	1,39	112	44
600	280	660	1,50	110	51
700	295	670	1,61	108	57
800	310	680	1,73	107	64
900	325	690	1,85	106	71
1000	335	690	1,98	105	78
1100	345	700	2,11	104	85
1200	355	710	2,25	104	91
1300	365	710	2,40	103	98
1400	375	720	2,57	103	105
1500	390	730	2,75	102	112
1600	400	740	2,95	102	119

Уколико се не узима у обзир проширење барутне коморе, тада је:

$$p_m = \frac{1,12\varphi p_{mkr}}{1,02(1 + \frac{1}{2} \frac{m_b}{m})} \quad (3.3)$$

Дата табела састављена је за $K_m=15000 \frac{kg}{m^3}$. За $K_m=15000 \frac{kg}{m^3}$ треба повећати p_{mkr} за 5%, а L_c за 10%.

Критеријум за одређивање оптималног решења Слухоцки дефинише на следећи начин. Балистичко решење може се окарактерисати коефицијентом искоришћења дужине цеви $K_L=(\frac{v_0^2}{L_c})$ и радним веком цеви. Решење је боље уколико су ови параметри већи. Међутим, очигледно је да се са повећањем K_{m_b} смањује K_L и N , па због тога треба све величине некако објединити. У моменту стварања методе није било могуће наћи неку аналитичку везу између ових параметара. Критеријум је био добијен тзв. хеуристичким путем, тј. параметри су везани у облику производа, а степен њиховог утицаја одређен је на основу тада важећих мишљења да је најважније добити што краћу цев а живот цеви је био мање важан. На основу тога Слухоцки је предложио критеријум [5]:

$$Z = K_{m_b} K_L^4 \sqrt{N} \quad (3.4)$$

Живот цеви Слухоцки је дефинисао изразом:

$$N = K_n \frac{\lambda_u + 1}{\frac{m_b}{m} \lambda_u V_0^2 \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^2} \quad (3.5)$$

где су:

$K_n \approx 200$ средњи број опаљења, а

V_1 – брзина струјања у „грлу“ канала, тј. на крају прелазног конуса.

Однос $\frac{V_1}{V_0}$ даје се у табели 3.2 са улазним параметрима λ_u и χ_n , где је:

$$\chi_n = \frac{1}{\frac{1}{\chi} + \frac{0,75d}{X_0}} \quad (3.6)$$

Замењујући K_{m_b} , K_L и N у табели 3.2 и стављајући ознаку:

$$M = \frac{m V_0^9}{2} \sqrt{K_n m} \quad (3.7)$$

добија се

$$Z = M \frac{1}{m_b L_c^4 \frac{V_1}{V_0}} \sqrt{\frac{\lambda_u + 1}{m_b \lambda_u}} \quad (3.8)$$

Оптимално решење је оно које има највећу вредност Z . С обзиром на то да је величина M се може рачунати према горе наведеном изразу, а за њу узети било који број.

Табела 3.2. Веза између параметара у „грлу“ и устима цеви [5]

χ_n/λ_u	$10^3 \frac{V_1}{V_0}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,5	314	302	290	278	255	245	238	234	234	231
0,6	300	285	270	256	243	233	223	215	211	208
0,7	288	270	253	238	225	215	205	196	191	187
0,8	277	256	237	222	209	199	189	180	174	168
0,9	266	243	223	208	195	185	175	166	160	154
1,0	257	233	213	197	184	174	165	157	150	143
1,1	250	225	204	188	175	165	157	149	142	135
1,2	243	217	196	180	167	157	149	141	134	128
1,3	237	210	189	173	160	150	142	134	127	121
1,4	221	204	183	166	153	143	135	128	121	115
1,5	225	198	177	160	147	137	129	122	116	110
1,6	220	193	171	154	141	131	124	116	111	105
1,8	211	183	161	144	131	122	115	109	103	98
2,0	203	174	152	135	123	114	107	101	96	92
2,2	196	166	144	128	116	107	100	95	95	86
2,6	184	153	131	116	105	97	91	86	81	77
3,0	173	142	120	105	95	88	83	78	74	70

Поступак прорачуна је следећи [5]:

1. Рачуна се K_e ;
2. Из табеле 1.1 зависно од K_e , одреди се p_{mkr} , ρ , χ , Km_b , L_c и рачуна се m_b ;
3. Изводи се низ приближних прорачуна за одређене карактеристике. Притом се m_b мења за 5 до 10%. Ако се претпоставља флегматизовано пуњење, максимални крешерни притисак смањује се за 3%, а почетна брзина се повећава за 0.5%. Прорачуни се изводе све док се не нађе m_b за који је вредност Z највећа;
4. Уколико добијена дужина не задовољи задату (а то је условљено), повећава се p_{mkr} (обично за 10%) и понавља се прорачун. При повећању p_{mkr} , треба повећати и ρ . При прорачуну треба водити рачуна и о осталим ограничењима;
5. За изабрано m_b изводи се тачнији прорачун, узимајући у обзир χ .

3.2. Пројектовање оруђа калибра 155 mm

Пројектовати оруђе калибра 155 mm, масе пројектила 43,5 kg и почетне брзине 826 m/s.

На основу почетних података рачуна се K_e , на следећи начин:

$$K_e = \frac{mv_0^2}{2d^3} = 3,984 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$$

Из табеле 3.1. следи:

$$p_{mkr} = 239,6 \text{ МПа}$$

$$\rho = 619,4 \text{ kg/m}^3$$

$$\chi = 1.278$$

$$K_{m_b} = 114.06 \cdot 10^4 \text{ J/kg}$$

$$K_m = \frac{m}{d^3} = 11681 \text{ kg/m}^3$$

Због $K_m \approx 10^4$ треба повећати p_{mkr} за 5%. Због флегматизатора треба p_{mkr} смањити за 3%, а почетну брзину повећати за 0,5%. Тада је:

$$p_{mkr} = 244,0326 \text{ МПа}$$

$$v_0 = 830,13 \text{ m/s}$$

Попречни пресек цеви је:

$$S_c = 0.81 \cdot d^2 = 1,95 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Маса барута се рачуна по следећем обрасцу:

$$m_b = \frac{m \cdot v_0^2}{2 \cdot K_{m_b}} = 13,141 \text{ kg}$$

За потребе прорачуна се користи добијена маса барута, маса барута увећана за 5% и маса барута увећана за 10%.

Табела 3.2: Резултати прорачун

Образац	Резултати		
	I	II	III
m_b	13,141	13,789	14,455
$W_0 = m_b/\rho$	0,212	0,223	0,233
$X_0 = W_0/S_c$	1,0871	1,1436	1,1949
$\varphi = 1.03 + \left(\frac{1}{3}\right) \cdot m_b/m$	1,131	1,136	1,141
$p_m = \frac{1.12 \cdot \varphi \cdot p_{mkr}}{1.02 \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{m_b}{m}\right)}$	263,291	262,731	262,178
$V_{tab} = V_0 \sqrt{\frac{\varphi m}{m_b}}$	1606.23	1570,98	1528.24
λ_u (таблице ГАУ)	4,78	4,37	4,02
$X_u = X_0 \cdot \lambda_u$	5,196	4,997	4,803
$X_{kom} = X_0 / \chi$	0,85	0,89	0,93
$L_c/d = \frac{X_{kom} + X_u}{d} + 1.5$	40,51	39,48	38,49
$\chi_n = \frac{1}{\frac{1}{\chi} + \frac{0.75 d}{X_0}}$	1,12	1,13	1,14
v_1/v_0 (табела 3.2. [1])	0,173	0,185	0,184
Z (са $M = 1000$)	0,085	0,083	0,087

Из претходне табеле се види да је по критеријуму Z најбоља трећа варијанта (највећа вредност).

Бира се варијанта 3 и за њу се изводи тачнији прорачун:

Табела 3.3: Тачнији прорачун

Образац	Резултати
$\lambda_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_u + 1/\chi}{\lambda_u + 1}$	0,4783
$\lambda_2 = 2\lambda_1/3$	0,3189
$\varphi = 1.03 + \lambda_2 \cdot m_b/m$	1,135
$p_m = \frac{1.12 \cdot \varphi \cdot p_{mkr}}{1.02 \cdot (1 + \lambda_1 \cdot \frac{m_b}{m})}$	262,42
$V_{tab} = V_0 \sqrt{\frac{\varphi m}{m_b}}$	1534
λ_u (таблице ГАУ)	3,98
$X_u = X_0 \cdot \lambda_u$	4,756
$L_c/d = \frac{X_{kom} + X_u}{d} + 1.5$	38,1

Тако се добијају следећи резултати:

$$W_0 = 0,233 \text{ m}^3, Sc = 1.95 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2, X_u = 4,756 \text{ m}, \chi = 1.278, m_b = 13,141 \text{ kg},$$

$$m = 43,56 \text{ kg}, L_c/d = 38,1, p_{mkr} = 262,42 \text{ МПа и } v_0 = 830,13 \text{ m/s}.$$

На крају се рачуна укупни импулс. Из таблица ГАУ, за $\rho = 619,4 \text{ kg/m}^3$ и $p_{mkr} = 262,42 \text{ МПа}$, добија се вредност параметра $B = 1,760$.

Тада је:

$$I_k = \frac{1}{s_c} = \sqrt{B \cdot \varphi \cdot m \cdot f_b \cdot m_b} = 1.771475 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

4. Аналитички модел унутрашњебалистичког прорачуна

У циљу одређивања узајамне везе развоја притиска барутних гасова и пређеног пута пројектила унутар цеви оруђа, дефинисане су одговарајуће зависности између карактеристичних величина. То је уједно и основни задатак унутрашње балистике и овим прорачунима се утврђује да ли пројектил има довољну почетну брзину на устима цеви и да ли у току процеса опаљења барутних гасова у цеви прелази дозвољену границу [6].

У овом делу је одрађен унутрашње балистички прорачун методом Дроздова као и варирање појединих параметара.

4.1. Метода Дроздова

За топ-хаубицу Нора Б-52 користи се барут NC80. На следећем извештају су дати реални улазни подаци.

Извештај 4.1. Улазни подаци за УБ прорачун

UB-PRORACUN METODOM DROZDOVA
ORUDJE: 155 MM B-52
BARUT: NC80

JEDINICE PO SI SISTEMU MERA

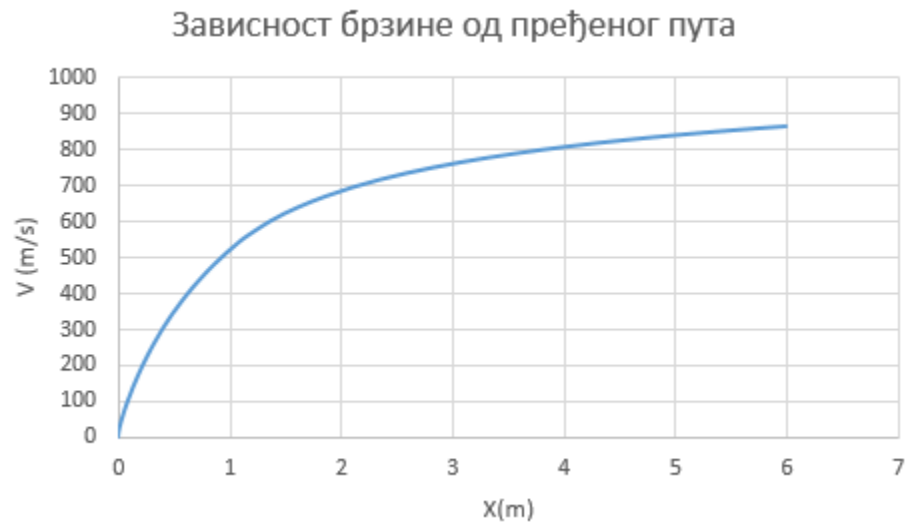
POLAZNI PODACI

W0=.015752	S=.019700	XU=5.99	FI=1.1270	M=43.560
OM=11.027	F= 975449.	DELM=1600.	ALFA=.00096	TETA=.269
E0=.00130	AKAPA=1.00287	LAM=-.00286	U1=.922E-09	P0=.300E+08
GUSTINA PUNJENJA DELTA=700.				

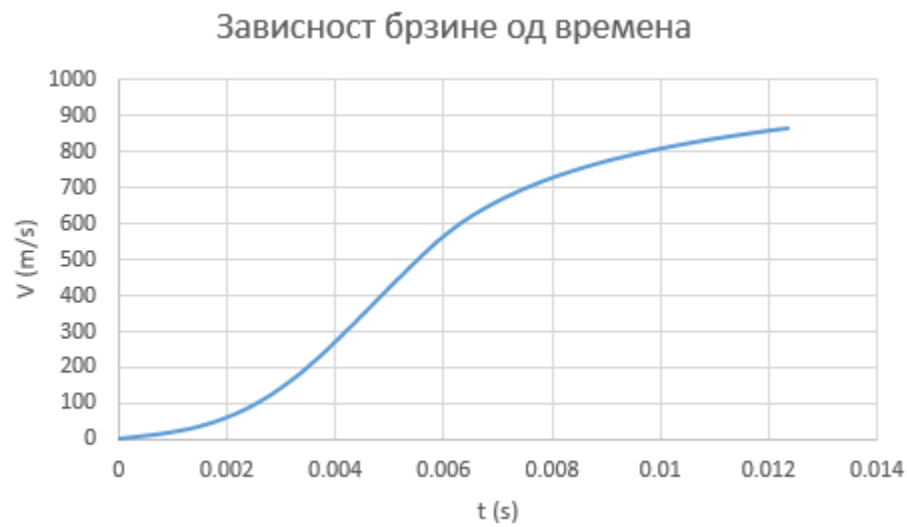
Резултати се деле на три дела [6]:

- претходни период (пројектил се не креће),
- први период (од почетка кретања пројектила до сагоревања барута) и
- други период (од краја сагоревања барута до тренутка када пројектил напусти уста цеви).

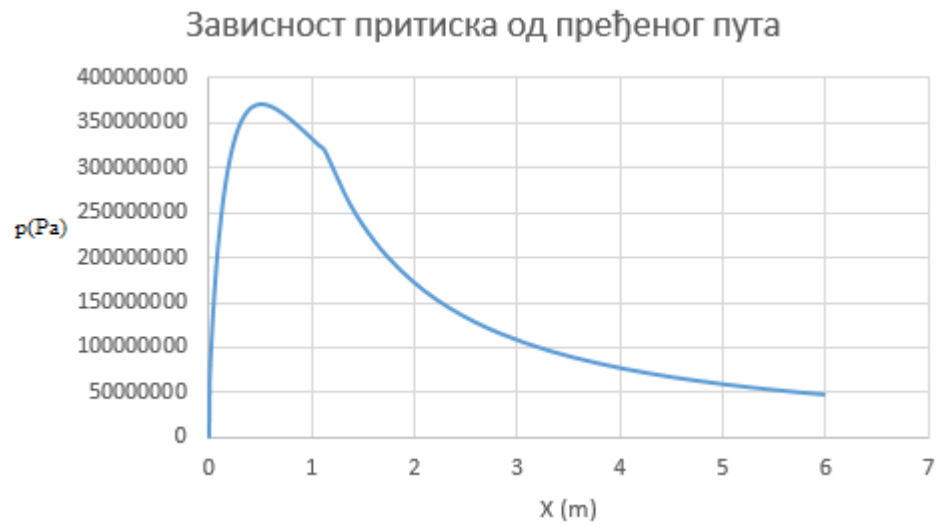
На следећим дијаграмима се могу видети резултати прорачуна.



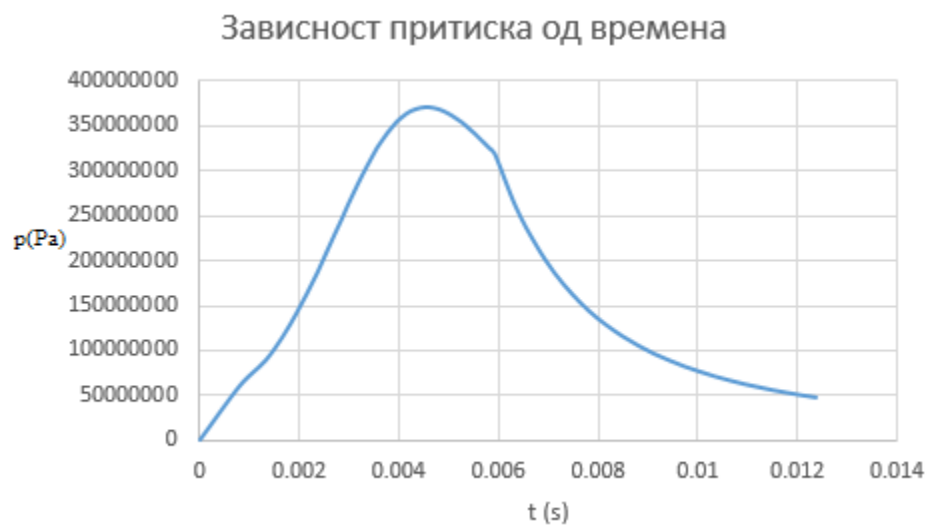
Дијаграм 4.1. Зависност брзине од пређеног пута



Дијаграм 4.2. Зависност брзине од времена



Дијаграм 4.3. Зависност притиска од пређеног пута



Дијаграм 4.4. Зависност притиска од времена

4.2. Варирање улазних параметара у фази оптимизације

Варирање појединих параметара врши се са циљем налажења оптималног решења. Циљ је повећати почетну брзину, а да притисак остане испод граничне вредности (вредности до које цев може издржати). Такође, мора се избећи и непотпуно сагоревање.

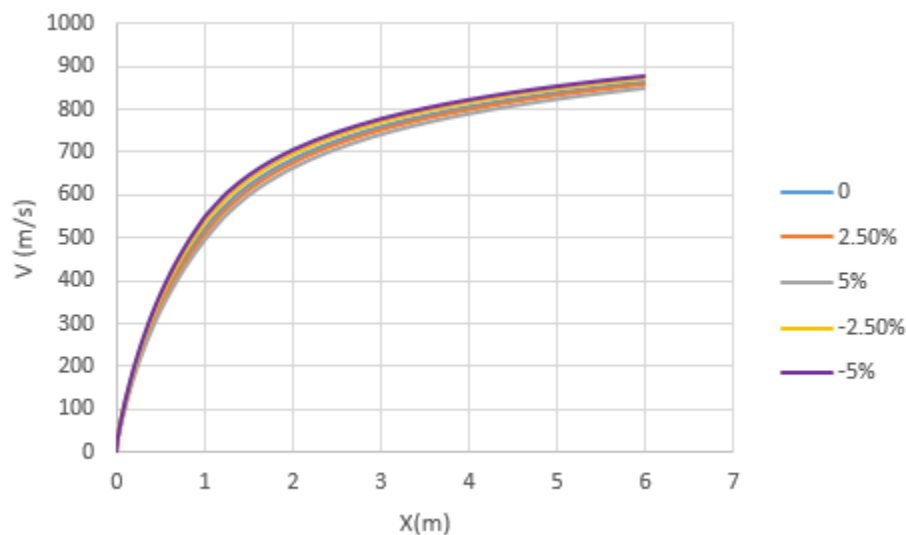
Варираће се један параметар, док остали параметри задржавају почетну вредност. Одређени параметри ће бити варирани у опсегу $\pm 5\%$, док ће неки бити варирани у опсегу $\pm 10\%$ (у оба случаја варирање у 5 корака).

Параметри које ће бити варирани:

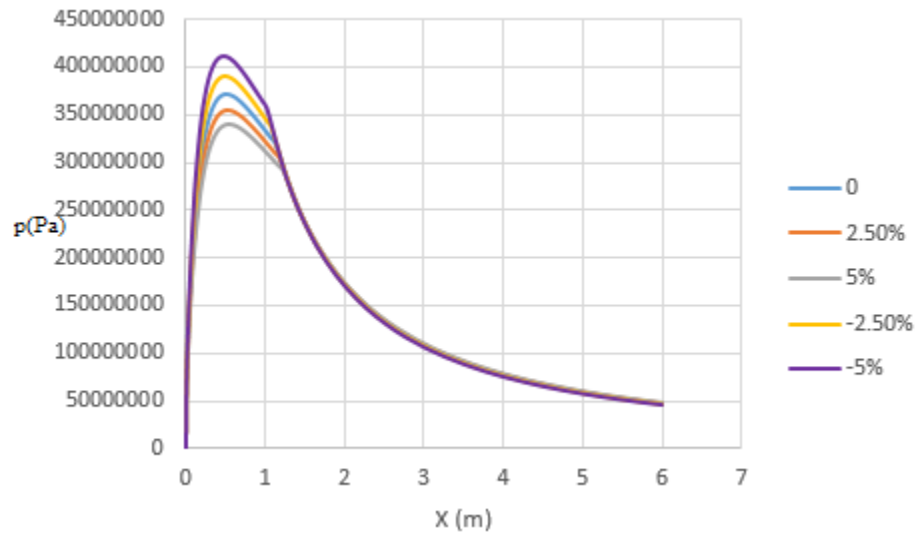
- запремина барутне коморе (W_0),
- маса пројектила (m),
- дужина водишта пројектила (x_u),
- маса барута (m_b) и
- Q_w чијом применом се мењају три параметра (f_b , α и u_{z0}).

4.2.1. Варирање запремине барутне коморе

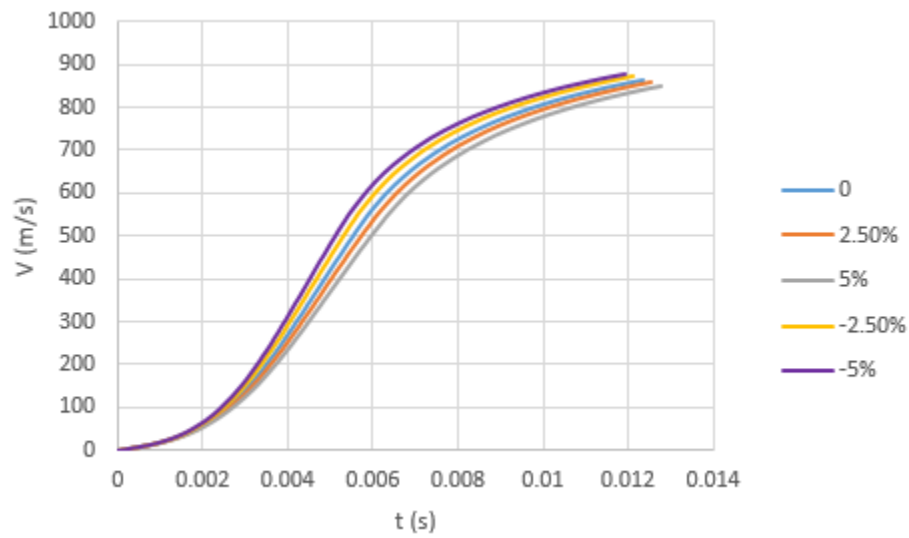
Запремина барутне коморе (W_0), варирана је у опсегу $\pm 5\%$ и добијени резултати су приказани на следећим дијаграмима и табели.



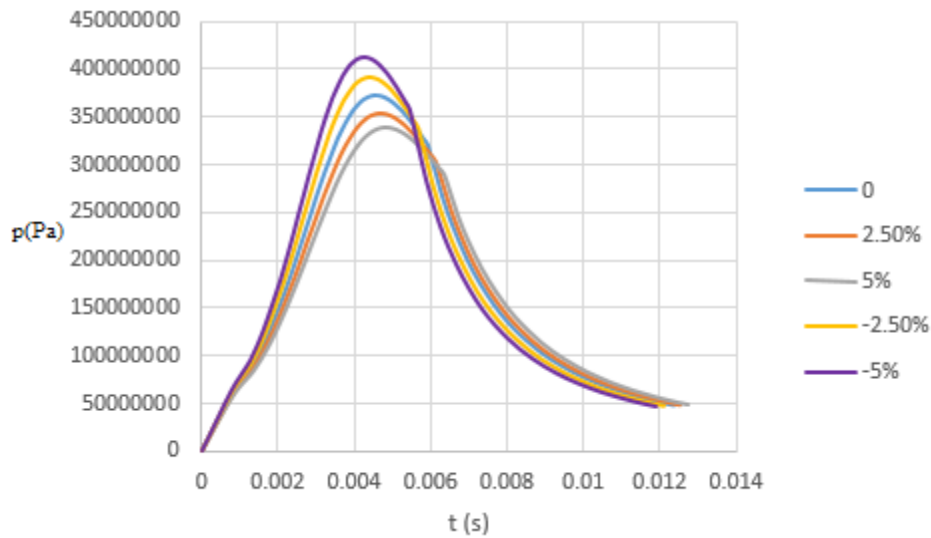
Дијаграм 4.5. Зависност брзине од пређеног пута



Дијаграм 4.6. Зависност притиска од пређеног пута



Дијаграм 4.7. Зависност брзине од времена



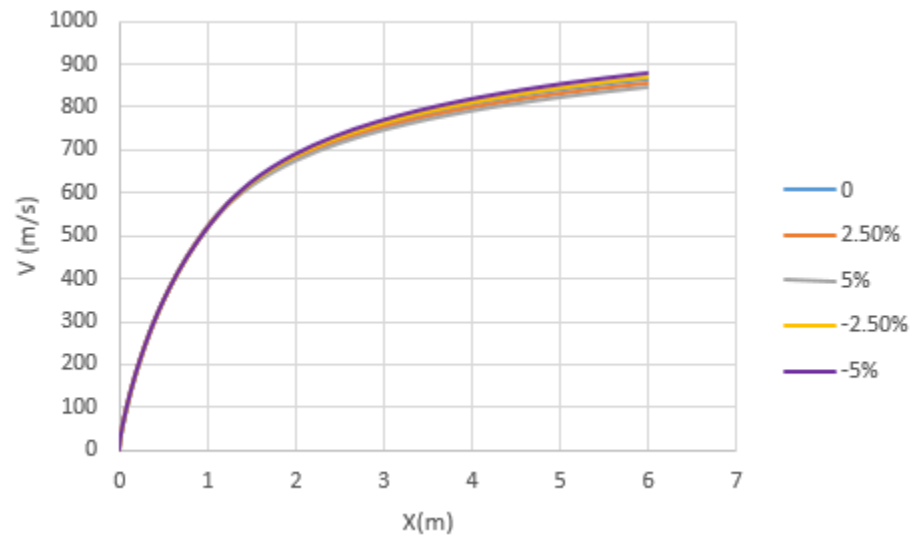
Дијаграм 4.8. Зависност притиска од времена

Табела 4.1: Битне вредности варирања

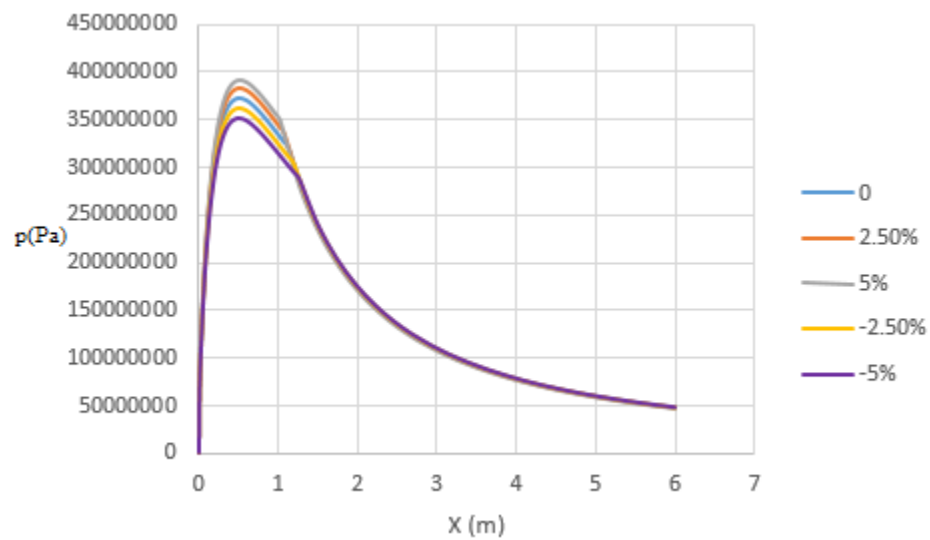
Вредност (m ³)	Промена у %	p _{max} (Pa)	Промена у %	V (m/s)	Промена у %
0,015752	/	3717*10 ⁵	/	863	/
0,0161458	+2,5%	3546*10 ⁵	-4,6%	856	-0,8%
0,0165396	+5%	3391*10 ⁵	-9,8%	849	-1,6%
0,0153582	-2,5%	3908*10 ⁵	+5,1%	870	+0,8%
0,0149644	-5%	4122*10 ⁵	+10,9%	878	+1,8%

4.2.2. Варирања масе пројектила

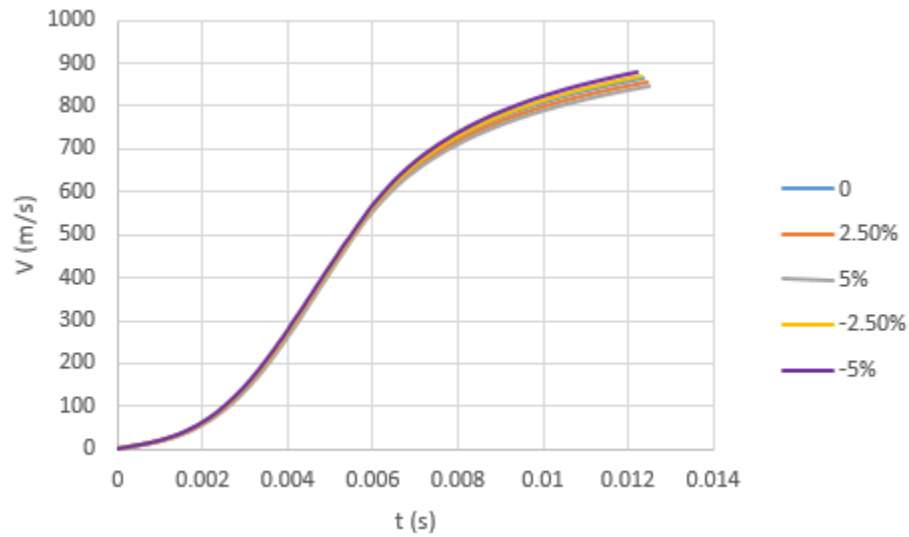
Маса пројектила (m_p), варирана је у опсегу $\pm 5\%$ и добијени резултати су приказани на следећим дијаграмима и табели.



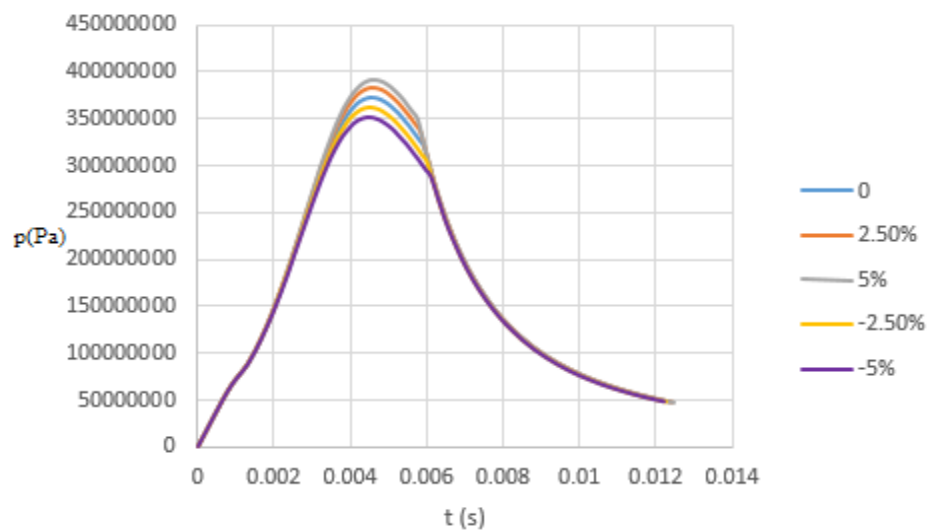
Дијаграм 4.9. Зависност брзине од пређеног пута



Дијаграм 4.10. Зависност притиска од пређеног пута



Дијаграм 4.11. Зависност брзине од времена



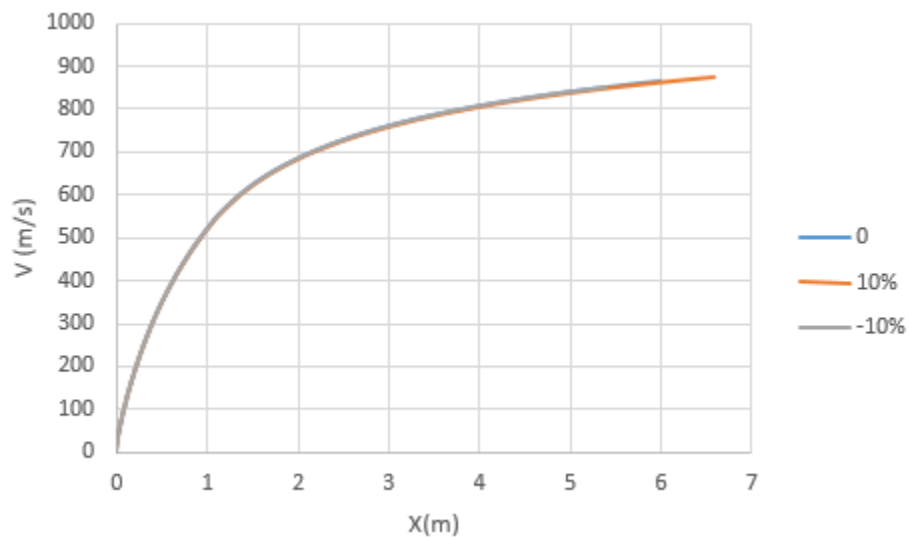
Дијаграм 4.12. Зависност притиска од пређеног пута

Табела 4.2. Битне вредности варирања

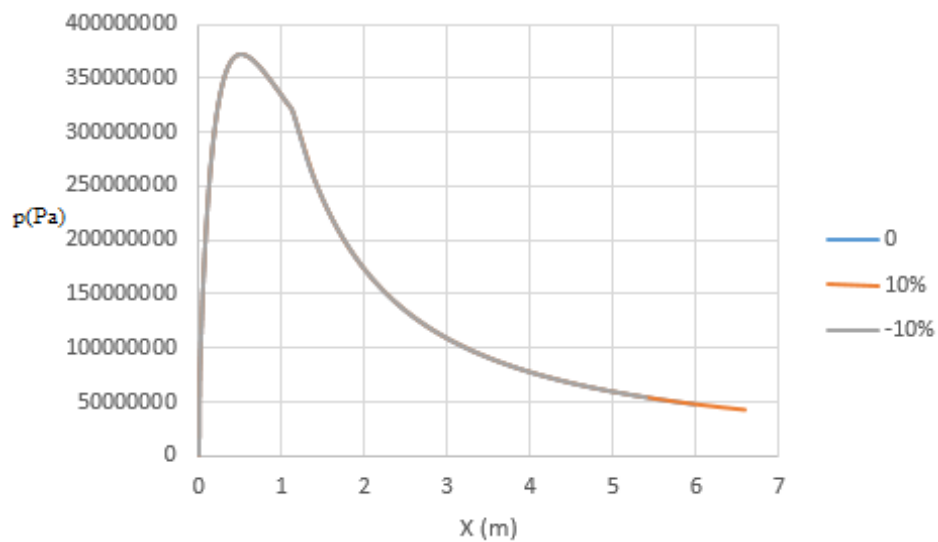
Вредност (kg)	Промена у %	$p_{\max}$ (Pa)	Промена у %	V (m/s)	Промена у %
43,56	/	$3717 \cdot 10^5$	/	863	/
44,649	+2,5%	$3819 \cdot 10^5$	+2,7%	855	-0,9%
45,738	+5%	$3922 \cdot 10^5$	+5,5%	847	-1,9%
42,471	-2,5%	$3617 \cdot 10^5$	-2,7%	871	+1%
41,382	-5%	$3517 \cdot 10^5$	-5,4%	879	+1,9%

4.2.3. Варирање дужине водишта пројектила

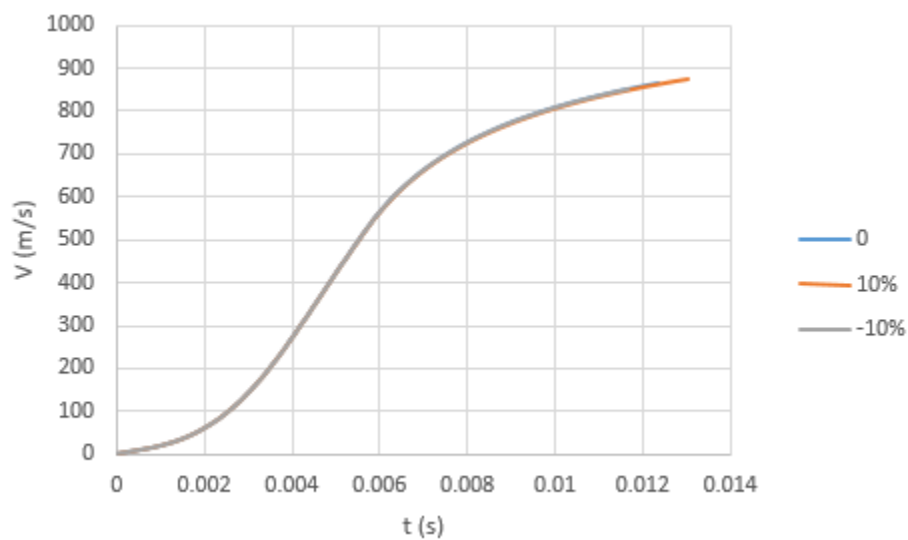
Дужина водишта пројектила (x_d), варирана је у опсегу $\pm 10\%$ (3 корака) и добијени резултати су приказани на следећим дијаграмима и табели.



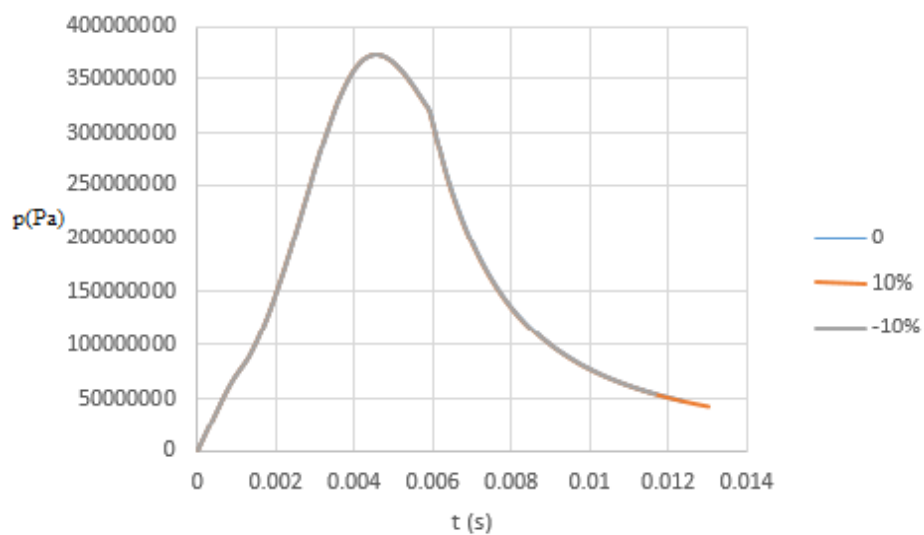
Дијаграм 4.13. Зависност брзине од пређеног пута



Дијаграм 4.14. Зависност притиска од пређеног пута



Дијаграм 4.15. Зависност брзине од времена



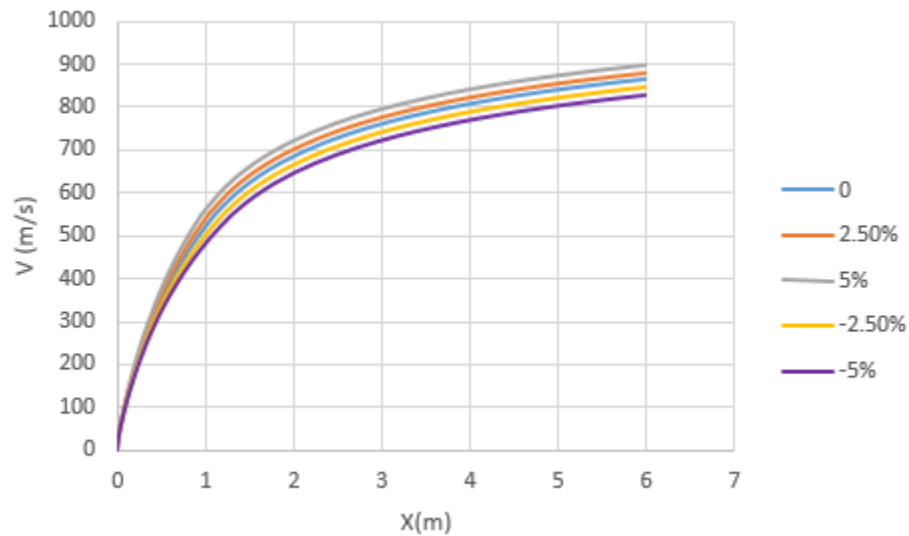
Дијаграм 4.16. Зависност притиска од времена

Табела 4.3. Битне вредности варирања

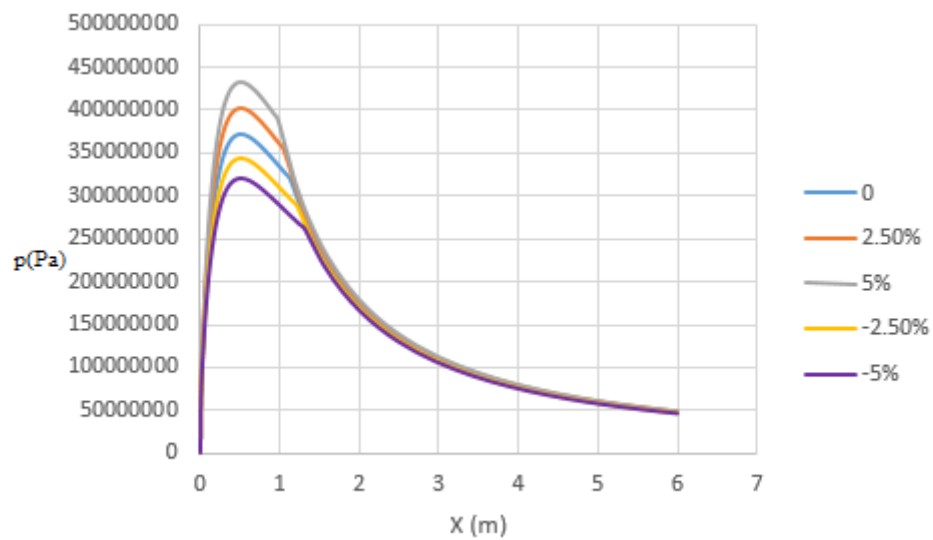
Вредност (m)	Промена у %	$p_{\max}$ (Pa)	Промена у %	V (m/s)	Промена у %
5,99	/	$3717 \cdot 10^5$	/	863	/
6,589	+10%	$3717 \cdot 10^5$	/	875	+1,4%
5,391	-10%	$3717 \cdot 10^5$	/	849	-2,1%

4.2.4. Варирање масе барута

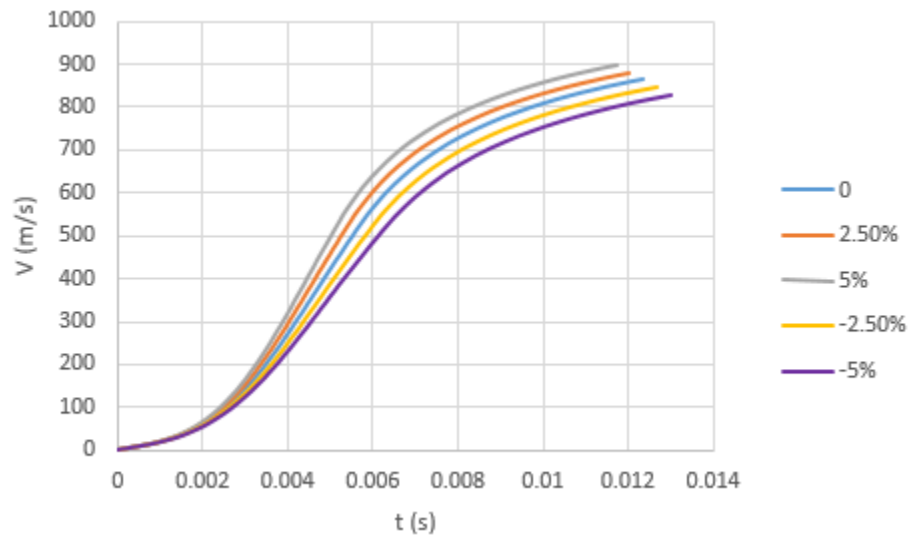
Маса барута (m_b) NC80 варирана је у опсегу $\pm 5\%$ и добијени резултати су приказани на следећим дијаграмима и табели.



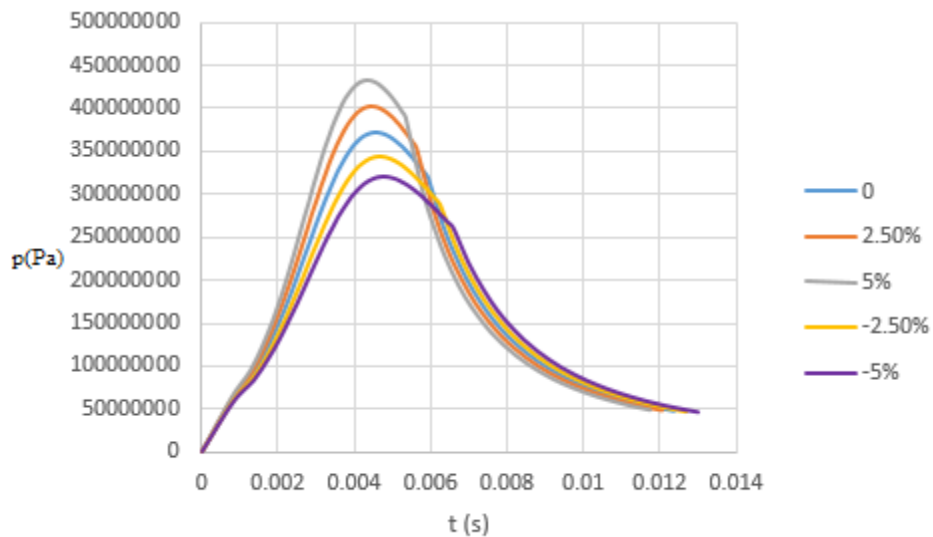
Дијаграм 4.17. Зависност брзине од пређеног пута



Дијаграм 4.18. Зависност притиска од пређеног пута



Дијаграм 4.19. Зависност брзине од времена



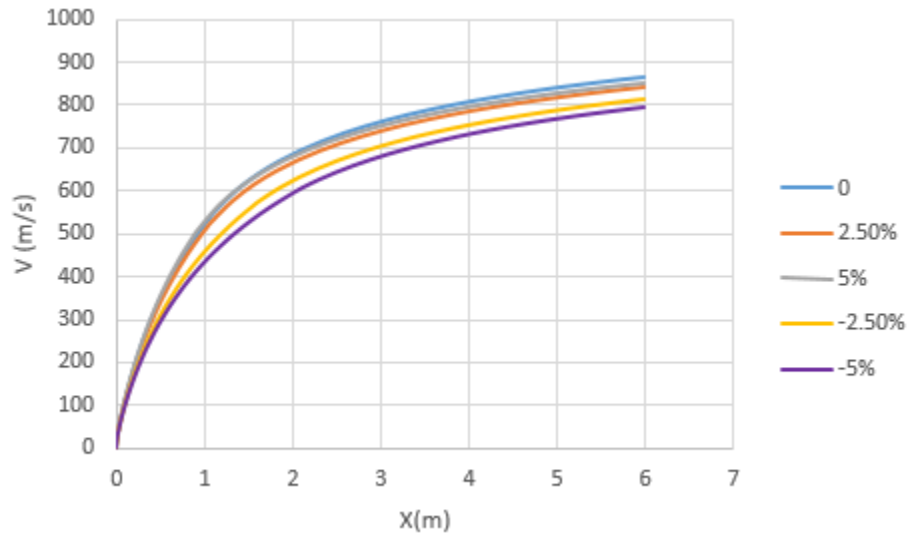
Дијаграм 4.20. Зависност притиска од времена

Табела 4.4. Битне вредности варирања

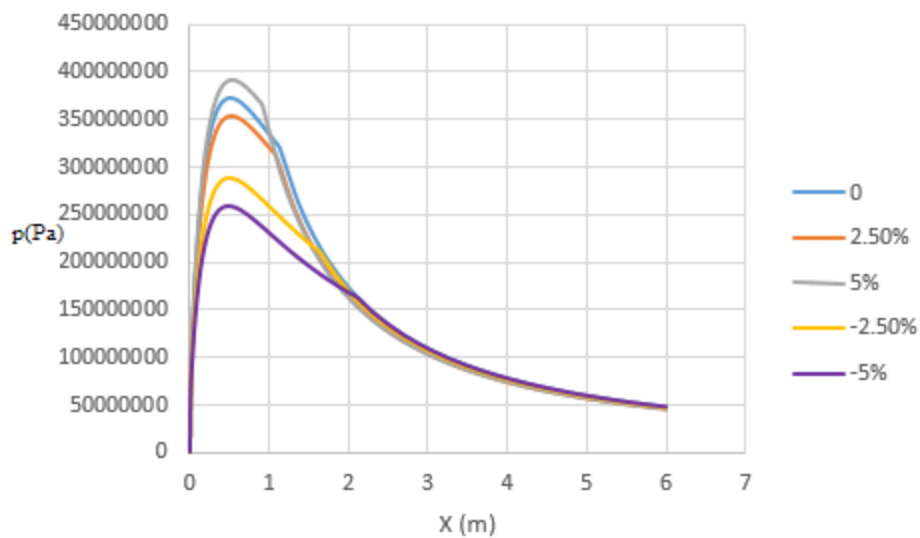
Вредност (kg)	Промена у %	$p_{\max}$ (Pa)	Промена у %	V (m/s)	Промена у %
11,027	/	$3717 \cdot 10^5$	/	863	/
11,303	+2.5%	$4013 \cdot 10^5$	+8%	880	+2%
11,578	+5%	$4335 \cdot 10^5$	+16,6%	898	+4%
10,751	-2,5%	$3447 \cdot 10^5$	-7,3%	845	-2%
10,476	-5%	$3200 \cdot 10^5$	-15%	828	-4%

4.2.5. Варирање зависних компоненти

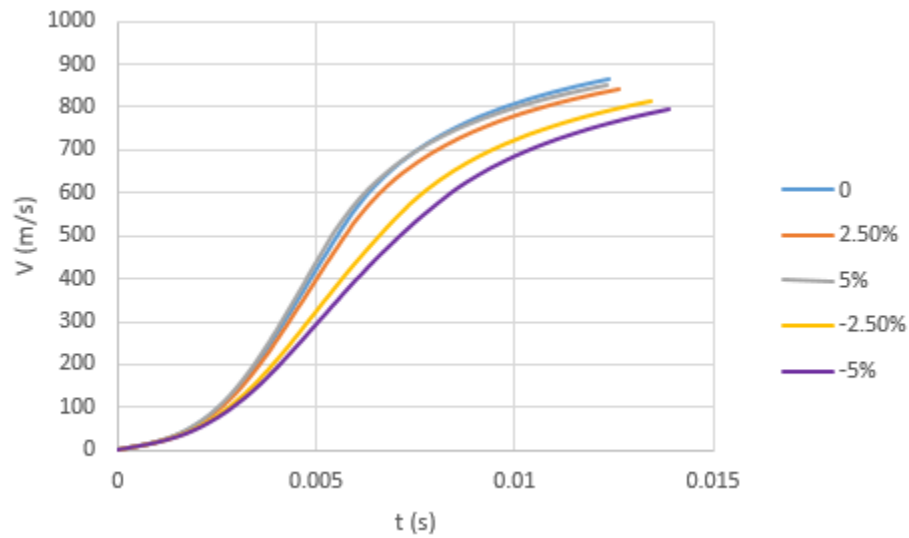
Варирањем Q_w варирају се три компоненте на које Q_w утиче (специфичан рад барутних гасова, коволумен барутних гасова и јединична брзина сагоревања) и које представљају полазне параметре за прорачун. Резултати варирања Q_w и компоненти приказани су на следећим дијаграмима и табели.



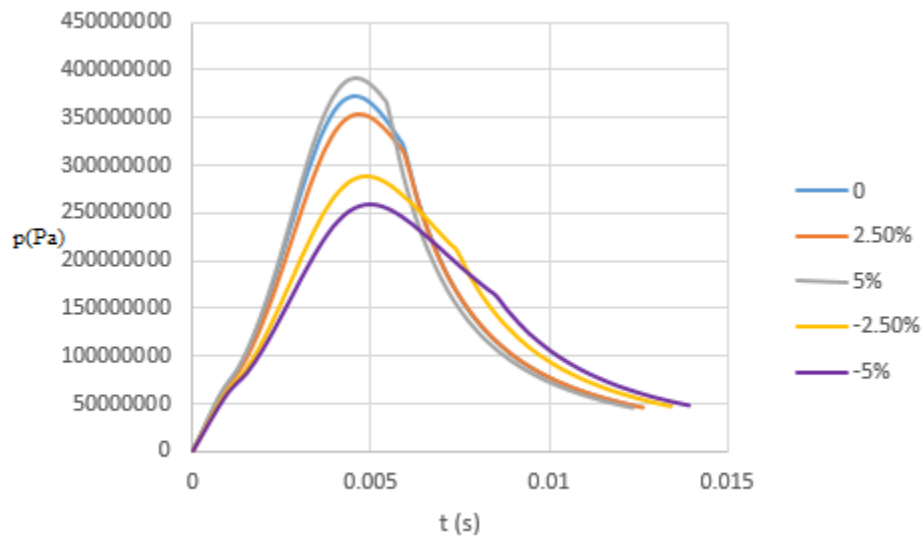
Дијаграм 4.21. Зависност брзине од пређеног пута



Дијаграм 4.22. Зависност притиска од пређеног пута



Дијаграм 4.23. Зависност брзине од времена



Дијаграм 4.24. Зависност притиска од времена

Табела 4.5. Битне вредности варирања

Вредност Q_w	Промена у %	f_b (m ³ /kg)	α (m ³ /kg)	u_{z0} (m/sPa)	p_{max} (Pa)	Промена у %	V (m/s)	Промена у %
3532	/	975449	0,000962	$9,223 \cdot 10^{-10}$	$3717 \cdot 10^5$	/	863	/
3620	+2,5%	983612	0,0009492	$9,6436 \cdot 10^{-10}$	$3541 \cdot 10^5$	-8,2%	841	-2,4%
3708	+5%	991912	0,0009368	$10,06424 \cdot 10^{-10}$	$3911 \cdot 10^5$	+5,2%	852	-1,7%
3443	-2,5%	966917	0,0009739	$8,79754 \cdot 10^{-10}$	$2877 \cdot 10^5$	-22,6%	812	-5,9%
3355	-5%	958616	0,0009863	$8,3769 \cdot 10^{-10}$	$2585 \cdot 10^5$	-30,5%	794	-8%

4.3. Оптимално решење

Главни захтев који је потребно задовољити је обезбеђење што веће почетне брзине пројектила како би му била саопштена што већа кинетичка енергија. У зависности од величина које се варирају, то обично условљава повећање максималног притиска б/г у цеви оруђа. То није случај код варирања укупног пута пројектила. Услед повећања дужине цеви максимални притисак у њој се не мења већ само максимална брзина. Граница за максимални притисак је постављена на $4080 \cdot 10^5$ Pa, односно максимално повећање притиска у односу на основни прорачун може бити у границама до $\approx 10\%$ како не би дошло до пластичних деформација зида канала цеви. Још један услов је да сагоревање мора бити потпуно у циљу максималног коришћења енергије барутних гасова.

У следећој табели дат је преглед свих оптималних решења.

Табела 4.6. Оптимална решења

	Основни прорачун	W_0 -2,5%	m_p +5%	X_u +10%	m_b +2,5%	Q_w +5%
$p_{\max}$ (Pa)	$3717 \cdot 10^5$	3908	3922	3717	4013	3911
V (m/s)	863	870	847	875	880	852

На следећем дијаграму су вредности почетне брзине код оптималних варирања.



Дијаграм 4.25. Оптимална решења варијација.

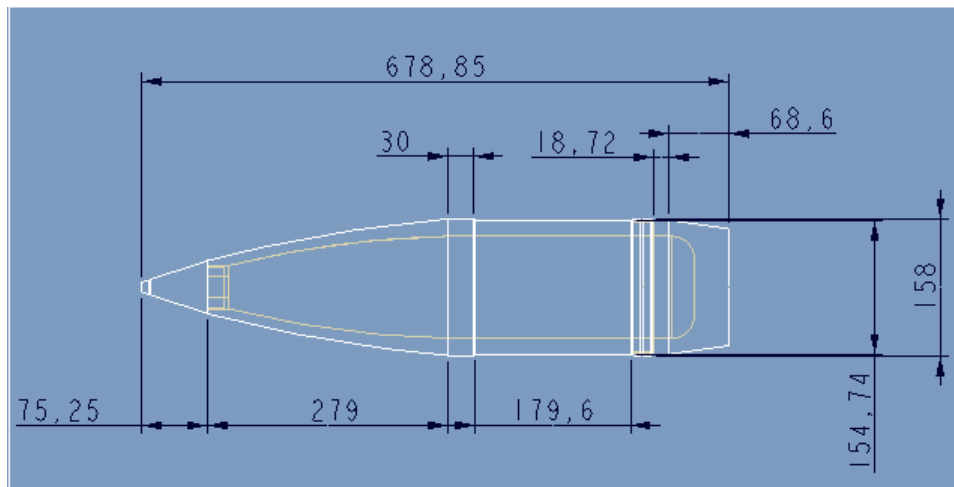
Из дате табеле видимо да се највеће повећање брзине постиже када се маса барута повећа за 2,5%. Међутим, као најоптималније решење бира се продужење водишта пројектила јер максимални притисак остаје исти а брзина се повећава са 863 на 875 m/s.

5. Прорачун елемената лета пројектила

У овом делу је одрађен спољно балистички прорачун елемената лета пројектила. На основу изабраног модела пројектила у CAD алату су одређене динамичке карактеристике пројектила. Потом је извршено одређивање аеродинамичких коефицијената оносиметричног опструјавања (програмско решење ADK0) који је потребан за одређивање елемената путање (програмско решење OJL3SSK). Након тога је одрађен прорачун систематских и случајних одступања (програмско решење TVERP).

5.1. Модел пројектила

На следећој слици се налази радионички цртеж за изабрани тренутно фугасни (ТФ) пројектил 155 mm M107.



Слика 5.1. Цртеж ТФ пројектила 155 mm M107

Динамичке карактеристике моделираног пројектила 155 mm дате су у следећој табели.

Табела 5.1. Динамичке карактеристике пројектила 155 mm M107 према CAD алату

Карактеристика	Ознака	Вредност	Јединица мере
Референтни пречник - калибар	d	155	mm
Маса пројектила	m	45,13	kg
Положај центра масе од врха	x _{CM}	0,444	m
Уздужни момент инерције	I _{xx}	0,14811	kg m ²
Попречни момент инерције	I _{yy}	1,42156	kg m ²

5.2. Одређивање аеродинамичких коефицијената

Одређивање аеродинамичких коефицијената модела ТФ пројектила 155 mm, карактеристика датих на слици 5.1 и табели 5.1, биће реализовано помоћу следећег прорачуна:

- прорачун аеродинамичног коефицијента аксијалне силе за случај осносиметричног опструјавања – програмским решењем ADK0.

За пројектил датих конструктивних карактеристика извршен је прорачун аеродинамичког аксијалног коефицијента за случај осносиметричног струјања око пројектила, са програмским решењем ADK0 (ADK0.FOR), [10] према програмским решењима [8,9,11]. Полазни подаци за прорачун аеродинамичких коефицијената аксијалне силе са програмом ADK0 дати су према геометријским параметрима пројектила представљеним у табели 5.2.

Табела 5.2. Улазни подаци за прорачун аеродинамичких коефицијената

Улазни параметар	Ознака	Вредност	Јединица мере	Вредност у калибрима
референтни пречник	d	155	mm	1
дужина пројектила	l	678,85	mm	4,379
дужина предњег дела	l ₁	354,25	mm	2,285
однос полупречника оживала*	R _t /R	-	-	1
дужина задњег конуса	l ₃	68,6	mm	0,443
пречник дна пројектила	d _d	134,7	mm	0,869
пречник врха пројектила	d _m	13,6	mm	0,087
пречник водећег прстена	d ₄	158	mm	1,019
положај центра масе од врха пројектила	x _{CM}	444	mm	2,865

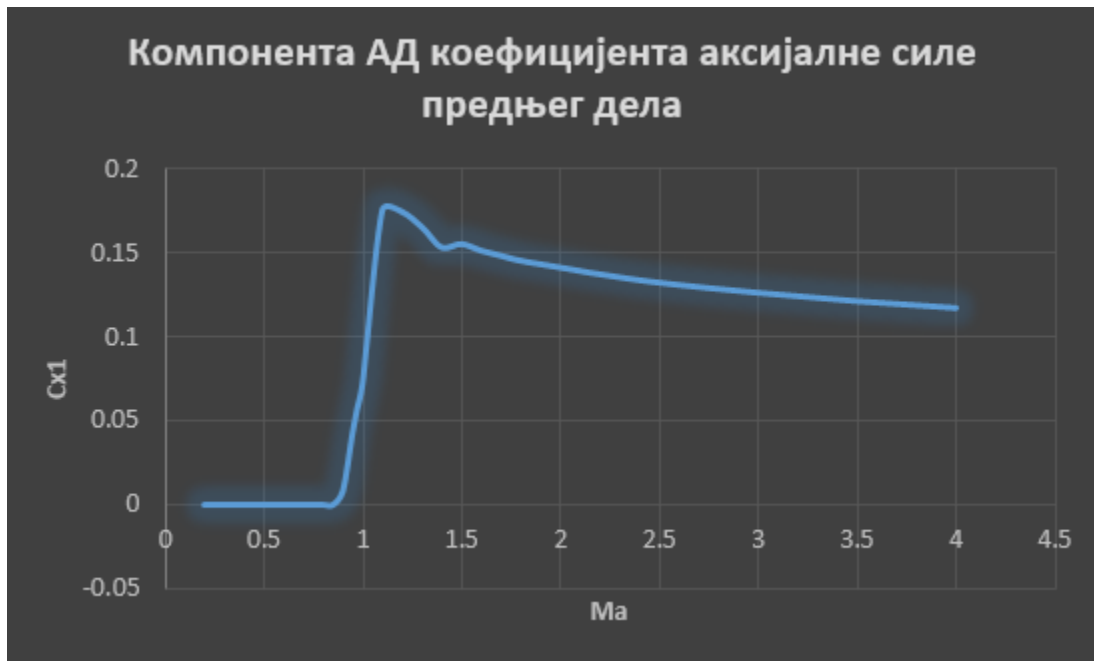
* однос полупречника оживала је у случају тангентног оживала RTR=1, за случај секантног оживала 0<RTR<1 и за случај конуса RTR=0

Резултати прорачуна аеродинамичких коефицијената аксијалне силе при осносиметричном опструјавању ADK0, на основу полазних података датих у претходној табели представљени су у табели 5.3.

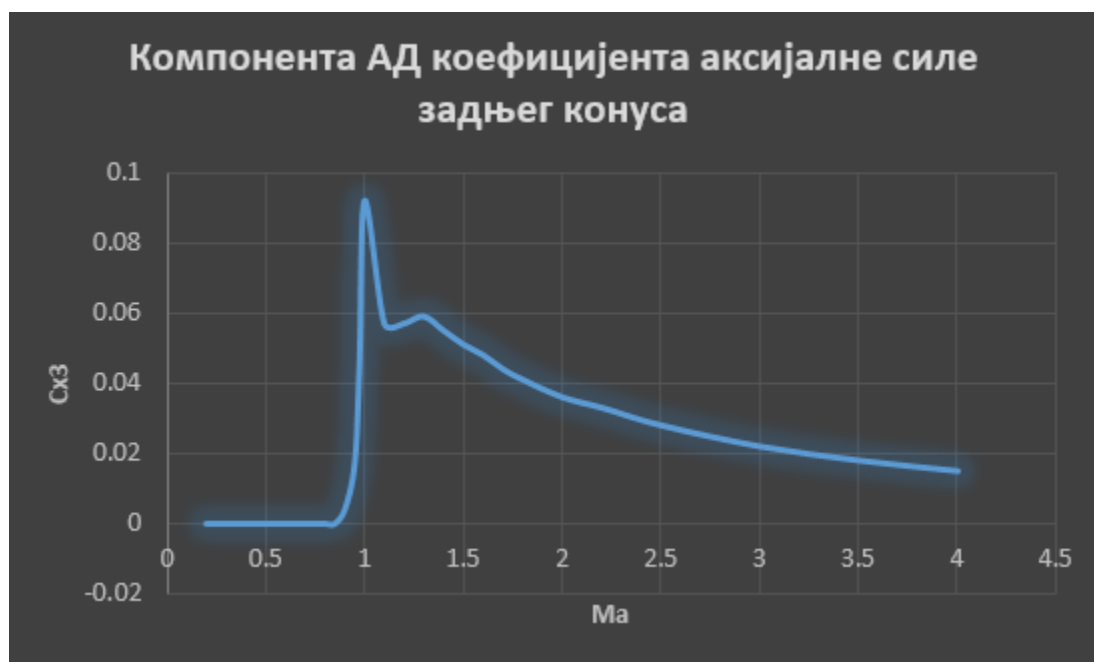
Табела 5.3. Резултати прорачуна

Махов број	АДК предњег дела	АДК задњег конуса	АДК водећег прстена	АДК трења	АДК дна	Укупан АДК аксијалне силе
Ма	C_{x1}	C_{x3}	C_{x4}	C_{xf}	C_{xd}	C_{x0}
0,2	0	0	0	0,053	0,083	0,136
0,5	0	0	0	0,045	0,091	0,136
0,6	0	0	0	0,043	0,094	0,138
0,7	0	0	0	0,042	0,098	0,140
0,8	0	0	0,001	0,041	0,102	0,144
0,85	0	0	0,002	0,040	0,104	0,146
0,9	0,008	0,004	0,004	0,040	0,106	0,162
0,95	0,043	0,017	0,008	0,039	0,108	0,214
0,975	0,058	0,045	0,010	0,039	0,109	0,261
1	0,072	0,092	0,009	0,038	0,141	0,354
1,1	0,175	0,057	0,008	0,037	0,140	0,418
1,2	0,174	0,057	0,008	0,037	0,137	0,412
1,3	0,165	0,059	0,007	0,036	0,135	0,402
1,4	0,153	0,055	0,007	0,035	0,132	0,382
1,5	0,155	0,051	0,006	0,034	0,129	0,376
1,6	0,151	0,048	0,006	0,033	0,126	0,364
1,7	0,148	0,044	0,006	0,032	0,123	0,354
1,8	0,145	0,041	0,006	0,032	0,119	0,343
2	0,141	0,036	0,005	0,030	0,112	0,324
2,2	0,137	0,033	0,005	0,029	0,104	0,307
2,5	0,132	0,028	0,005	0,027	0,093	0,285
3	0,126	0,022	0,005	0,025	0,076	0,253
3,5	0,121	0,018	0,004	0,023	0,062	0,227
4	0,117	0,015	0,004	0,021	0,051	0,2070

Графичка интерпретација укупног и компоненти аеродинамичких коефицијента аксијалне силе добијене аеродинамичким прорачуном АДК0 за модел ТФ пројектила 155 mm M107, представљене су на следећим дијаграмима у зависности од Маховог броја.



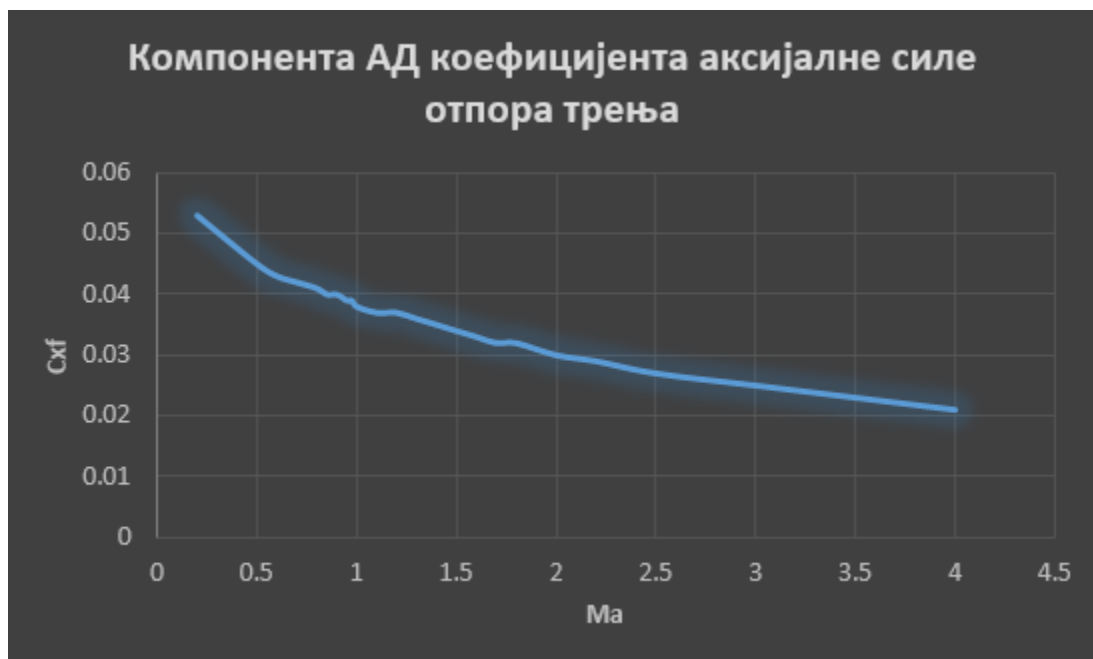
Дијаграм 5.1. Компонента аеродинамичног коефицијента аксијалне силе предњег дела



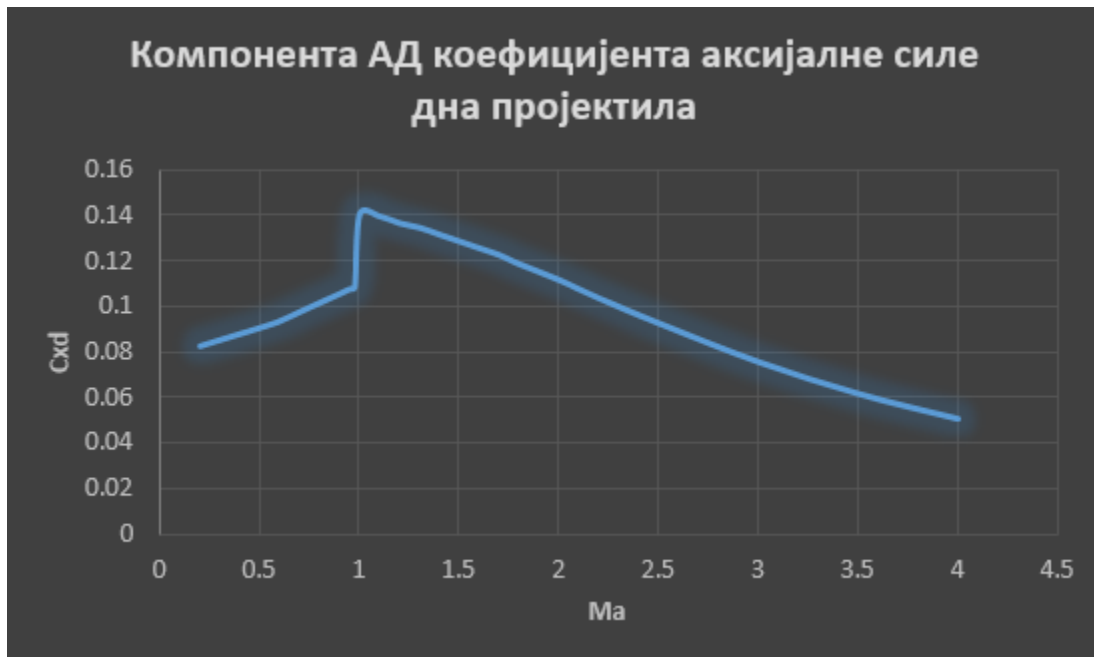
Дијаграм 5.2. Компонента аеродинамичног коефицијента аксијалне силе задњег конуса



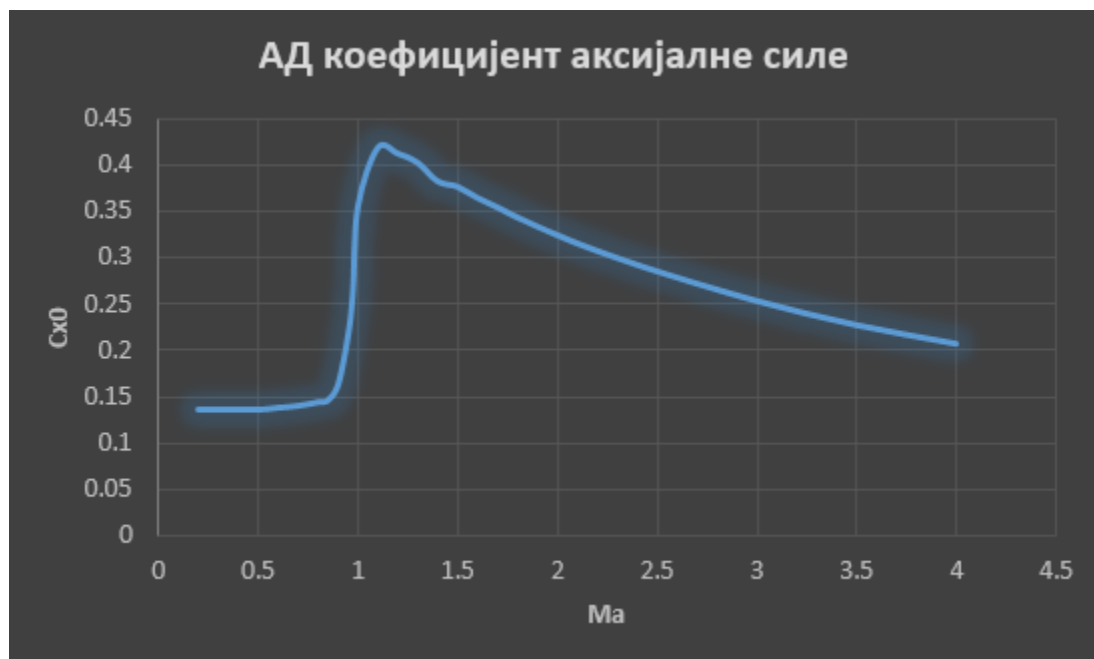
Дијаграм 5.3. Компонента аеродинамичног коефицијента аксијалне силе водећег прстена



Дијаграм 5.4. Компонента аеродинамичног коефицијента аксијалне силе отпора трења



Дијаграм 5.5. Компонента аеродинамичног коефицијента аксијалне силе дна пројектила



Дијаграм 5.6. Аеродинамички коефицијент аксијалне силе

5.3. Одређивање елемената путање

За ТФ пројектил 155 mm M107 дат на слици 5.1 и вредности аеродинамичног коефицијента аксијалне силе датим у табели 5.3, извршен је прорачун елемената путање у карактеристичним тачкама на путањи по Ојлеровом балистичком моделу, са програмским решењем OJL3SSK (OJL3SSK.FOR), [8,10].

Полазни подаци за прорачун елемената путање су представљени у табели 5.4. Полазни подаци о балистичком коефицијенту добијени су према коефицијенту облика добијеном односом аеродинамичног коефицијента аксијалне силе (силе отпора ваздуха) добијеном прорачуном ADK0, и еталон функције коефицијента отпора ваздуха по Закону из 1943. СССР, [4, 8]. Вредности прорачуна су представљени у табели 5.5, за пројектил калибра $d=155$ mm, масе $m=45,13$ kg.

Табела 5.4. Улазни подаци за прорачун елемената путање са програмом OJL3SSK

Улазни параметар	Ознака	Вредност (интервал вредности)	Јединица мере
висина (ордината) падне тачке	YH	0,0	m
балистички коефицијент	CS	0,5281	-
полазна вредност полазног угла	TET0	40,0	°
прираштај вредности полазног угла	DTET	1,0	°
крајња вредност полазног угла	TETK	53,0	°
полазна вредност почетне брзине	VOP	863,0	m/s
прираштај вредности почетне брзине	DVOP	4,0	m/s
крајња вредност почетне брзине	VOK	875,0	m/s

Табела 5.5. Прорачун балистичког коефицијента у односу на еталон функцију отпора $C_{D43}(Ma)$, [8]

Махов број	АДК аксијалне силе према АДК0	АДК аксијалне силе – еталон СССР из 1943.	Коефицијент облика	$C_{43} = \frac{i_{43} \cdot d^2}{m} 10^3$
Ма	C_{x0}	C_{D43}	i_{43}	
0,85	0,146	0,175	0,834286	0,444133
0,9	0,162	0,19	0,852632	0,453899
0,95	0,214	0,258	0,829457	0,441562
0,975	0,261	0,292	0,893836	0,475834
1	0,354	0,325	1,089231	0,579853
1,1	0,418	0,382	1,0942241	0,58252
1,2	0,412	0,385	1,070133	0,569685
1,3	0,402	0,382	1,052356	0,560223
1,4	0,382	0,37	1,032432	0,549616
1,5	0,376	0,361	1,041551	0,554471
1,6	0,364	0,351	1,037037	0,552068
1,7	0,354	0,342	1,035088	0,555103
1,8	0,343	0,332	1,033133	0,549989
2	0,324	0,316	1,025316	0,545828
2,2	0,307	0,303	1,013201	0,539379
2,5	0,285	0,287	0,993031	0,528641
3	0,253	0,27	0,937037	0,498833

Вредност балистичког коефицијента за случај почетне брзине од 863 m/s до 875 m/s је дата просечном вредношћу за интервал Махових бројева $0,85 < Ma < 3,0$ и износи 0,5281.

Резултати прорачуна елемената путање у карактеристичним тачкама добијени су програмским решењем OJL3SSK и представљени у следећој табели.

Табела 5.6: Извод резултата прорачуна елемената путање при брзини 863 m/s

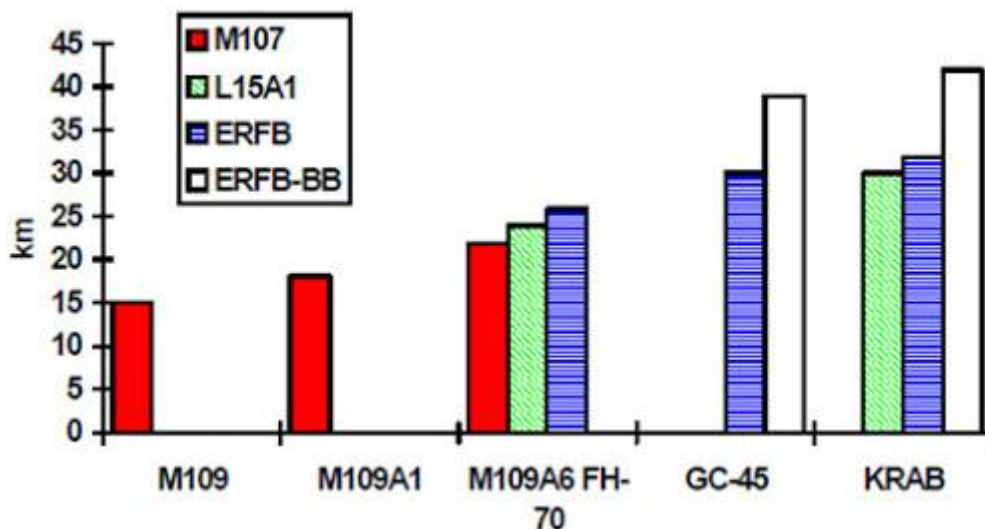
Параметар	Ознака	Јединица мере	Вредност параметара			
			Случај 1	Случај 2	Случај 3	Случај 4
Почетна брзина	V_0	m/s	863	863	863	863
Полазни угао	Θ_0	°	42	45	48	51
Домет	X	m	22347,15	22584,21	22655,06	22535,77
Висина падне тачке	y_c	m	0	0	0	0
Време лета	T	s	74,632	78,858	82,983	86,973
Падна брзина	V_c	m/s	333,69	335,82	337,87	88,268
Падни угао	Θ_c	°	-60,69	-62,90	-64,96	89,542

Табела 5.7: Извод резултата прорачуна елемената путање при брзини 875 m/s

Параметар	Ознака	Јединица мере	Вредност параметара			
			Случај 1	Случај 2	Случај 3	Случај 4
Почетна брзина	V_0	m/s	875	875	875	875
Полазни угао	Θ_0	°	42	45	48	51
Домет	X	m	22682,74	22930,44	23012,67	22903,51
Висина падне тачке	y_c	m	0	0	0	0
Време лета	T	s	75,384	79,666	83,847	87,892
Падна брзина	V_c	m/s	334,06	336,20	338,28	340,35
Падни угао	Θ_c	°	-60,99	-63,19	-65,23	-67,14

Као што видимо у претходним табелама (5.6 и 5.7) највећи (максимални) домет се у оба случаја постиже при полазним углом од 48°. При брзини од 863 m/s то је 22655,07 m, док је домет при брзини од 875 m/s 23012,67 m. што значи да се при промени од 12 m/s домет повећава за 357,6 m.

На следећој слици је приказано повећање домета за различите пројектиле 155 mm. Као што се на слици види за пројектил M107 домет је у границама са вредностима које су добијене прорачунима елемената путање при почетним брзинама од 863 и 875 m/s.

**Слика 5.2.** Повећање домета артиљеријских система 155 mm [7]

5.4. Прорачун мерила прецизности

Прорачун мерила прецизности за модел пројектила 155 mm, је урађен са програмским решењем TVERP, [9, 11]. Одређивање систематских одступања је извршено на основу прорачуна диференцијалних коефицијената у односу на вероватна одступања метеобалистичких услова гађања према методи разлика. Модел кретања пројектила за прорачун систематских и случајних одступања у програмском решењу TVERP, је заснован на Ојлеровом балистичком моделу, [4, 8]. Улазни подаци за прорачун диференцијалних коефицијената (систематских одступања) и вероватних скретања као мерила прецизности (случајна одступања) су за потребе прорачуна унета у улазну даботеку у прилогу и представљена у табели 5.8. Случајна одступања представљају низ узрока, који условљавају појаву растурања погодака и у пракси се статистички обрађују и интерпретирају поред вероватних скретања и са другим мерилима прецизности, као што су CEP (енг. Circular Error Probable), појасом језгра, средњим радијалним скретањем и сл., [4]. До одступања долази јер су поступци за одређивања ових мерила прецизности у основи експериментални. Прорачуном се добијају прорачунске вредности вероватних скретања по даљини и правцу. С обзиром да се ради о артиљеријском пројектилу за хаубицу, циљ је хоризонтална површина и кључне вредности мерила прецизности која се у раду разматрају са наведена вероватна скретања. (по даљини, Vd и правцу, Vp).

Табела 5.8. Улазни подаци за прорачун систематских и случајних одступања (562 m/s)

Улазни параметар	Ознака	Јединица мере	Вредност (интервал)
почетна брзина	VI	m/s	562
балистички коефицијент	CE		0,5281
вероватно одступање почетне брзине	RV0	m/s	1,5
вероватно одступање балистичког коефицијента	RC		0,01
вероватно одступање угла скретања	RPSI	°	0,015
вероватно одступање полазног угла	RT0	°	0,5
број даљина	NX		6,0
почетна даљина	XP	m	2000,0
прираштај даљине	DX	m	2000,0
висина циља	HC	m	100,0
ширина циља	PLC	m	100,0
дубина циља	DC	m	10,0

Одступање вредности балистичких коефицијената је 0,01% и оно је приказано је у следећој табели.

Табела 5.9. Одступања вредности балистичких коефицијената

Величине	Нормалне вредности	Одступање +1.5%	Одступање -1.5%	Одступање балистичких коефицијената у %
m	45,13	45,80695	44,45305	
d	0,155	0,155	0,155	
i	0,945	0,945	0,945	
C	0,503071682	0,495637125	0,51073267	0,015096

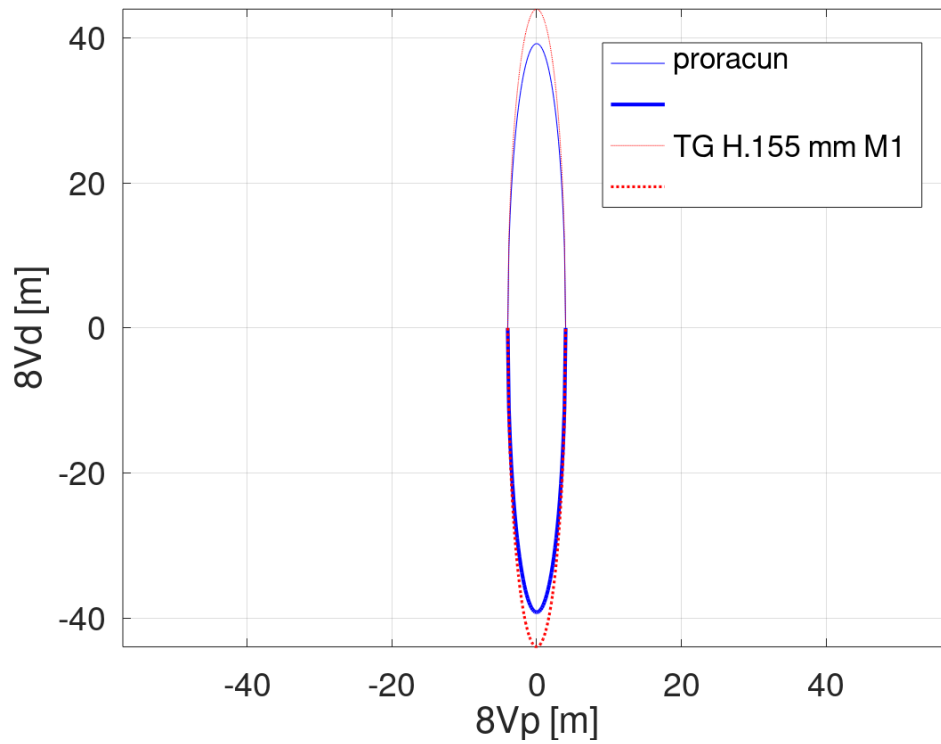
Резултати прорачуна за модел пројектила 155 mm са програмским решењем TVERP су за улазне податке из табеле 5.8 дати су у табели 5.10 и упоређени са вредностима из таблица гађања.

Табела 5.10. Упоређивање резултата прорачуна систематских и случајних одступања са таблицама гађања при брзини од 562 m/s

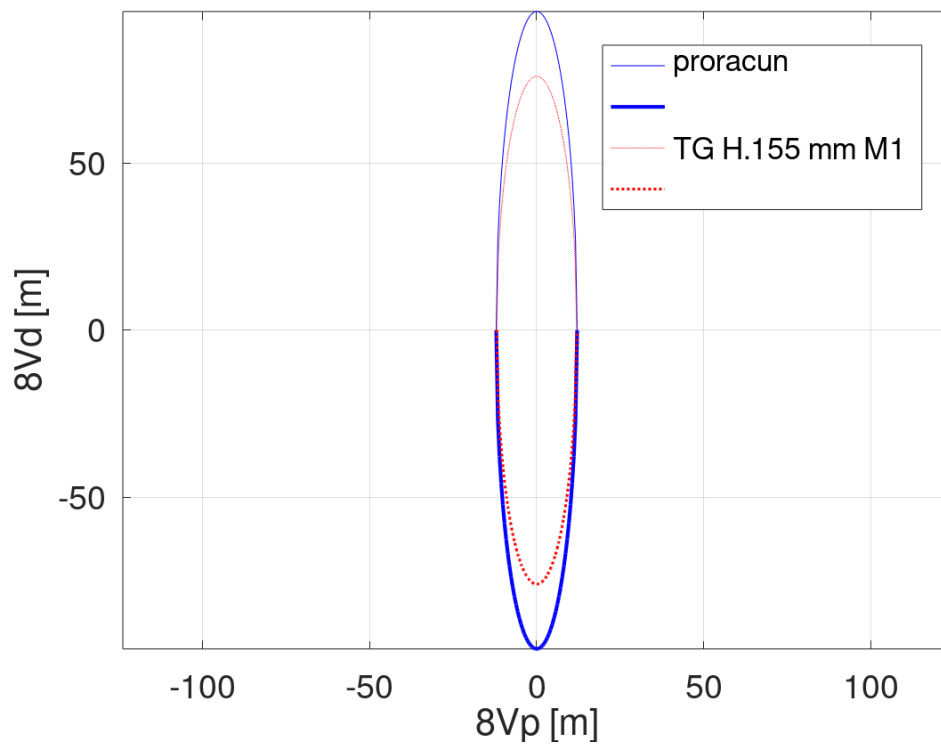
Даљина	Вероватно скретање по даљини (прорачун)	Вероватно скретање по даљини (таблица гађања)	Вероватно скретање по правцу (прорачун)	Вероватно скретање по правцу (таблица гађања)
X	Vd	Vd	Vp	Vp
m	m	m	m	m
2000	10	11	1	1
4000	18	14	2	2
6000	24	19	3	3
8000	28	24	4	4
10000	33	29	5	5
12000	35	34	7	7

Како за Нору Б-52 не постоје таблице гађања у раду су коришћене таблице гађања (ТГ) за америчку хаубицу М109. Упоређене су вредности вероватног скретања по даљини и правцу за пројектил М107, које су добијене на основу улазних података из табеле 5.8, са вредностима узетих из ТГ [12] за исти пројектил при почетној брзини од 562 m/s. Из претходне табеле се види да је вероватно одступање по правцу у границама док се вероватно одступање по даљини разликује од саме даљине и оно иде до 5%.

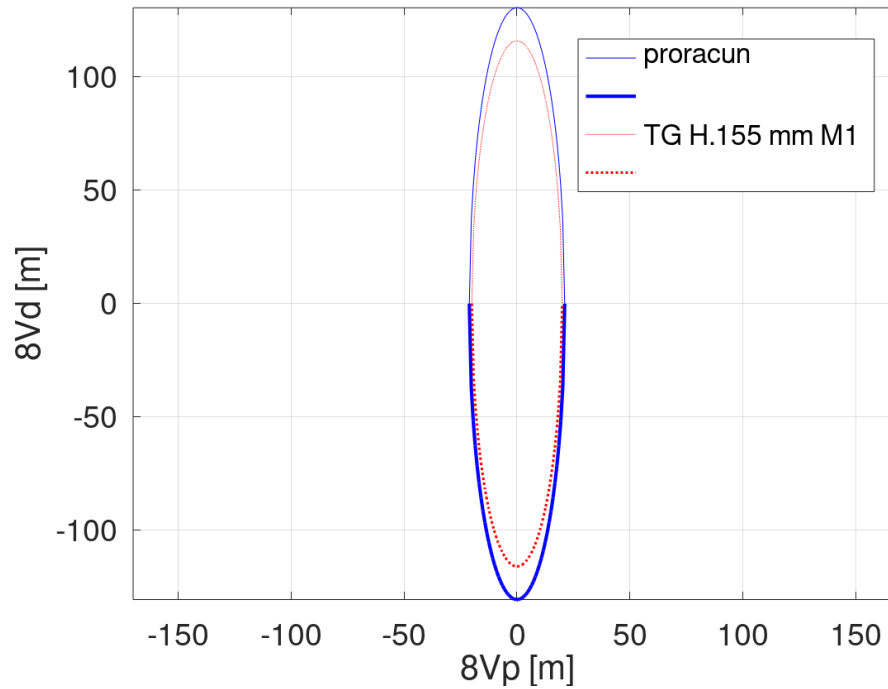
На следећим дијаграмима је приказана упоредна слика погодака на одређеним даљинама за прорачунске вредности и вредности из ТГ при брзини од 562 m/s.



Дијаграм 5.7. Слика погодака на 2000 m при $V_0=562$ m/s



Дијаграм 5.8. Слика погодака на 6000 m при $V_0=562$ m/s



Дијаграм 5.9. Слика погодака на 10000 m при $V_0=562$ m/s

Табела 5.11. Улазни подаци за прорачун систематских и случајних одступања (875 m/s)

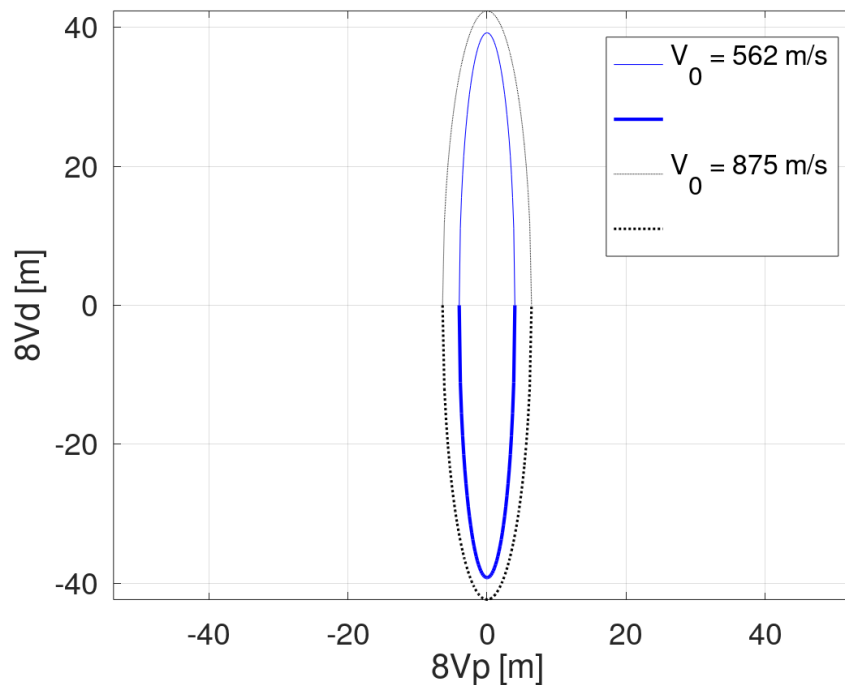
Улазни параметар	Ознака	Јединица мере	Вредност (интервал)
почетна брзина	VI	m/s	875
балистички коефицијент	CE		0,5281
вероватно одступање почетне брзине	RV0	m/s	2,5
вероватно одступање балистичког коефицијента	RC		0,015
вероватно одступање угла скретања	RPSI	°	0,015
вероватно одступање полазног угла	RT0	°	0,8
број даљина	NX		6,0
почетна даљина	XP	m	2000,0
прираштај даљине	DX	m	2000,0
висина циља	HC	m	100,0
ширина циља	PLC	m	100,0
дубина циља	DC	m	10,0

У табели 5.10 су дати улазни подаци за прорачу систематских и случајних одступања при почетној брзини од 875 m/s и резултати су приказани у табели 5.11. Како у ТГ нема података за ту почетну брзину претпоставка је да ће вероватно скретање по правцу остати и даље у границама док би вероватно скретање по даљини имало мања одступања због веће почетне брзине, чиме је прецизност већа.

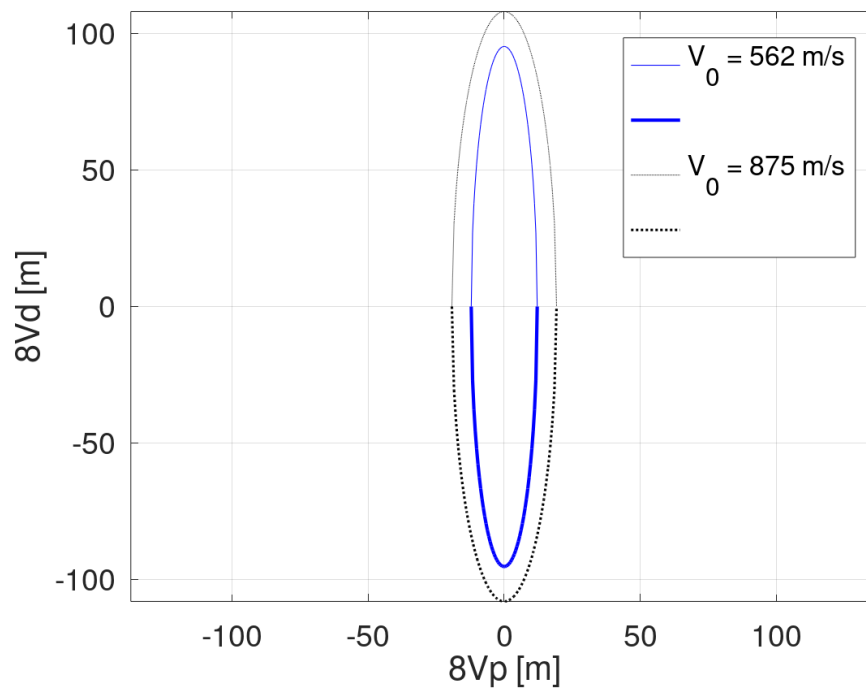
Табела 5.11. Резултати прорачуна систематских и случајних одступања за оптималну брзину 875 m/s

Даљина	Вероватно скретање по даљини (програмско решење)	Вероватно скретање по правцу (програмско решење)
X	Vd	Vp
m	m	m
2000	11	2
4000	20	3
6000	27	5
8000	33	6
10000	38	8
12000	43	10

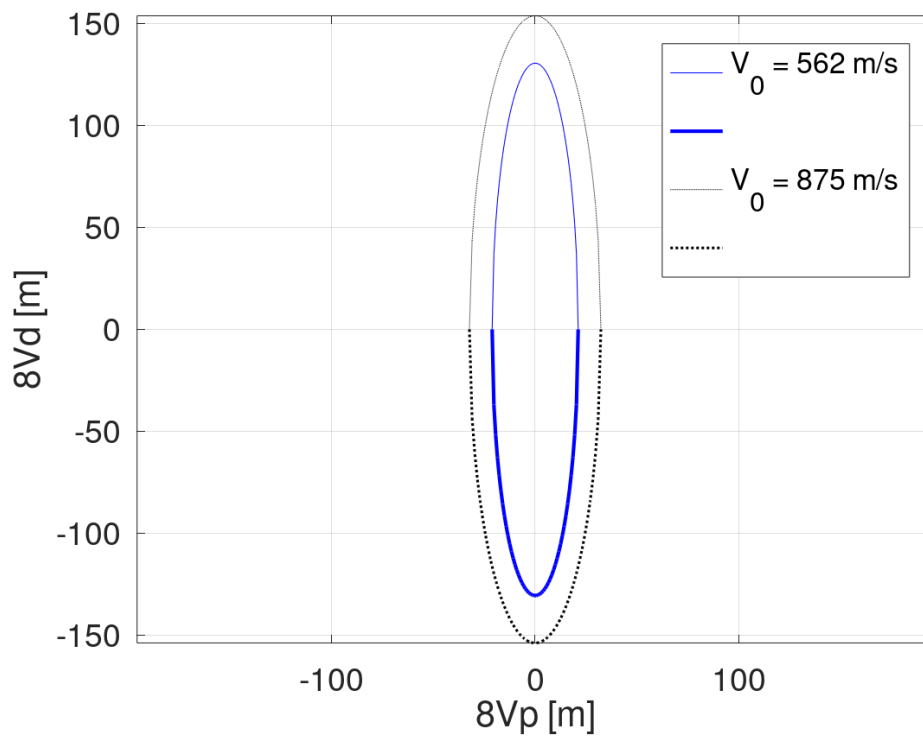
На следећим дијаграмима су упоредно приказана вероватна скретања по даљини и правцу за оба прорачуна.



Дијаграм 5.10. Упоредан приказ слике погодака за оба прорачуна на 2000 m



Дијаграм 5.11. Упоредан приказ слике погодака за оба прорачуна на 6000 m



Дијаграм 5.12. Упоредан приказ слике погодака за оба прорачуна на 10000 m

6. Закључак

Још од почетка развоја артиљеријске муниције главни циљ је био повећање домета и ефикасности на циљу. Повећање домета се остварило развојем нових оруђа са повећаном дужином цеви, коришћењем нових барутних пуњења, као и аеродинамичком оптимизацијом пројектила. Пример еволуције оруђа са аспекта дужине цеви може се видети на примеру оруђа калибра 155 mm, где се дужина повећала са 23 калибра на постојећих 52. Упоредо са тим развијена су и нова барутна пуњења са којима се остварују већи притисци барутних гасова.

У овом раду је извршена оптимизација унутрашњебалистичких параметара у фази пројектовања цеви топ-хаубице калибра 155 mm.

Пре саме оптимизације дат је историјски развој пројектила калибра 155 mm, као и ТТ карактеристике самог средства домаће производње Нора Б-52 које користи овај пројектил. Потом је одрађен аналитички метод пројектовања методом Слухоцког, где је од три прорачуната случаја изабран најоптималнији на основу ког је извршен још тачнији прорачун.

Након извршеног аналитичког пројектовања, одрађен је унутрашње балистички прорачун методом Дроздова на основу реалних података за топ-хаубицу 155 mm Нора Б-52. Резултати су приказани кроз дијаграме. Затим је одређено варирање улазних података ради добијање најоптималнијег решења. Циљ је био повећати почетну брзину да притом максимални притисак остане у граничној вредности. Резултати су такође приказани кроз дијаграме и табеле, и одабрано је оптимално решење.

На крају су одрађени прорачуни елемената путање за одабрано оптимално решење. На основу димензија изабраног пројектила одређени су аеродинамички коефицијенти помоћу којих је одрађен прорачун елемената лета пројектила, где је добијен максимални домет. Он је упоређен са максималним дометом тог пројектила, где је закључено да се прорачунски домет приближан стварном. Потом је одрађен прорачун мерила прецизности за оптимално решење. Добијени резултати одступања су упоређени са табличним одступањима и дошло се до закључка да нема велих одступања од реалних.

Упркос томе што су прорачуни дали веома коректне податке у поређењу са реалним, увек је пожељно и потребно да се изврше експериментална полигонска испитивања, на основу чијих резултата треба извршити одређене корекције у циљу лакшег решавања проблема.

Литература

- [1] Палигорић Л. А.: *Анализа концепције решења артиљеријских оруђа фамилије „Нора“*, Војнотехнички гласник, Београд, 2011.
- [2] <https://www.yugoimport.com/cir/proizvodi/samohodna-top-haubica-155-mm-nora-b52-0>, септембар 2020.
- [3] Кокерић Ђ.: *Самоходна топ-хаубица 155 mm Нора Б-52*, семинарски рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2020.
- [4] Регодић Д.: *Спољна балистика*, МО Војна Академија, Београд, 2006.
- [5] Танчић Љ.: *Унутрашње балистичко пројектовање*, МО Војна академија, Београд, 2014.
- [6] Танчић Љ.: *Класична унутрашња балистика*, МО Војна академија, Београд, 2006.
- [7] <http://www.vti.mod.gov.rs/fs/154/154.htm>, септембар 2020.
- [8] Регодић Д.: *Збирка решених задатака из спољне балистике*, МО Војна академија, Београд, 2003.
- [9] Јерковић Д., *Аеродинамика пројектила – лекција (е-материјал)*, МО Војна академија, Београд, 2010.
- [10] Јерковић Д.: *Материјал курса Спољне балистике SB_BVI6370* на сајту <http://moodle.mfkg.rs>
- [11] Регодић Д.: *Аеродинамика рационалног тела, лекција*, ВТА, Београд, 1996.
- [12] Henry E. H.: *Aerodynamics, dimensions, inertial properties, and performance of artillery projectiles*, 1977.