

Analiza sistematskih poremećaja sa procenom slučajnih odstupanja trajektorije projektila

The Analysis of Systematic Disturbances and the Estimation of Probable Variation of Projectile Trajectory

Dušan B. Regodić, Univerzitet Sinergija Bijeljina, Damir D. Jerković, Univerzitet odbrane u Beogradu, Vojna akademija

Sažetak—U radu je izvršena analiza sistematskih poremećaja metodom razlike u odnosu na verovatna odstupanja početnih uslova leta projektila. Rezultati proračuna sistematskih odstupanja su poslužila za realizaciju predikcije slučajnih odstupanja trajektorije leta projektila. Razmatrani su slučajevi odstupanja dela početnih uslova leta u odnosu na simulaciju leta projektila po modelu materijalne tačke u vertikalnoj ravni. Model aerodinamičkog opterećenja je sveden na aksijalni aerodinamički otpor za slučaj osnosimetričnog opstrujavanja tela. Rezultati sistematskih odstupanja i predikcija rezultata slučajnih odstupanja, u odnosu na raspoložive referentne eksperimentalne vrednosti odstupanja, pokazala su opravdanu mogućnost predviđanja ovih karakteristika sa velikim nivoom pouzdanosti. Neposredni rezultati proračuna su dobijeni kroz samostalni seminarski rad studenata osnovnih akademskih studija, korišćenjem programskih kodova posredstvom portala za učenje na daljinu (moodle platforme) Vojne akademije Beograd i Fakulteta inženjerskih nauka u Kragujevcu.

Ključne riječi – model leta; projektil; sistematska odstupanja; slučajna odstupanja; trajektorija.

Abstract – The analysis of systematic disturbances is done in the paper, using the method of differences, in relation to the probable variations of initial flight conditions. The calculated values of systematic disturbances are used in the prediction of probable disturbances of flight trajectory, as data for initial conditions. The cases of the deviation of the specific part of initial conditions is considered in the research, according to the flight simulation, through applied point mass motion method in the vertical plane. The applied aerodynamic model in the research is consisted of axial aerodynamic force in the axisymmetric case of flow field. The calculated values of systematic variations, as well as the predicted values of probable variations justified the possibility to predict the characteristics with high level of reliability. The presented results in the paper are extracted and derived from the student's essay projects at Bachelor academic studies, using the programmable calculation, mounted on the distributed learning portals (moodle portal) of the Military Academy Belgrade and the Faculty of Engineering Kragujevac.

Keywords – flight model; projectile; systematic disturbances; probable disturbances; trajectory

I. UVOD

Model proračuna se zasniva na modelu kretanja tela u vertikalnoj ravni. Telo je predstavljeno materijalnom tačkom na koju je definisano dejstvo sile gravitacije Zemlje i aerodinamičke sile otpora vazduha u pravcu vektora brzine leta, [1]. Model aerodinamičkog proračuna se zasniva na polu-empirijskoj metodi određivanja otpora tela specifičnog aerodinamičkog oblika projektila, [2,3,4,5,6]. Model aerodinamičkog proračuna omogućava određivanje aksijalnog aerodinamičkog koeficijenta pri nultom napadnom uglu (eng. Zero Yaw Drag), koji određuje intenzitet sile otpora vazduha tokom modela kretanja. Uslovi kretanja definisani su kroz početne uslove položaja centra mase tela, intenziteta i položaja vektora početne brzine, koraka vremenske numeričke integracije sistema jednačina kretanja, [1,2]. Inerciona i geometrijska svojstva tela, svedena su za model materijalne tačke. Verovatna odstupanja sistematskih uslova pod kojima se vrši kretanje su modelirana u skladu sa teorijom sumarnog uticaja svih uslova sa aspekata linearnog dejstva malih poremećaja, [2,7,8]. Diferencijalni koeficijenti su merila posebnih uticaja odstupanja uslova kretanja na parametre leta, koji su prema tome i određivani metodom razlike, [1,2,7,8].

Proračun navedenih aerodinamičkih karakteristika, modela kretanja i odstupanja uslova kretanja, kao i proračun sistematskih odstupanja izvršeno je za jedan model tela – projektila, [9,10]. Referentni model parametara atmosfere je bio standardna atmosfera prema ANA standardnoj atmosferi (rus. HAA), [1,2,9,10]. Referentni uslovi kretanja su definisani adekvatnim katalogom proizvođača, odnosno literaturom referentnih institucija bazirana na eksperimentalnim ispitivanjima i definisanim standardima, [1,9,10]. Verovatna odstupanja uslova kretanja u odnosu na referentna su izvedena iz podataka o izmerenim odstupanjima parametara leta tokom ispitivanja, [9,10].

II. METODE

Rešenjem modela kretanja tela projektila, dobijaju se elementi trajektorije, u funkciji polaznih vrednosti parametara brzine, ugla nagiba vektora brzine i dinamičkih i

aerodinamičkih karakteristika tela, koji se nazivaju osnovni parametri trajektorije, [1].

Rešavanje modela kretanja polazi od osnovnih pretpostavki, [1,7,8]:

- normalni atmosferski uslovi (ICAO / HAA),
- nema uticaja prenosnog inercijalnog kretanja i Koiolisovog efekta dejstva Zemlje na telo,
- ne postoji uticaj kretanja tela oko centra mase.

Za pretpostavljene uslove određeni su elementi trajektorije koji se daju u referentnim katalogima podataka o sistemu naoružanja (tablice gađanja ili balistički zbornik), [1,9,10].

Pretpostavljeni uslovi u praksi nisu u celini ostvareni, već će se u većoj ili manjoj meri razlikovati od referentnih, odnosno standardnih. Radi razmatranja dinamički izmenjivih polaznih uslova, neophodno je utvrditi kakav uticaj na elemente trajektorije imaju promene različitih parametara.

Odstupanja uslova kretanja od referentnih se nazivaju se poremećaji, odnosno perturbacije, [1,7,8].

Promena elemenata trajektorije usled izmenjenih polaznih uslova kretanja se nazivaju osetljivost, varijacije ili alternacije, [1].

Odstupanja uslova pod kojima se vrši kretanje u odnosu na pretpostavljene mogu biti:

1. Sistemska odstupanja i
2. Slučajna odstupanja.

Sistemska odstupanja uslova imaju predvidljiv, odnosno merljiv intenzitet i karakter uticaja na elemente i karakter trajektorije, dok slučajna odstupanja obuhvataju niz „skrivenih“ uticaja, koje u praksi nije opravdano meriti sa aspekta vremena, cene i raspoloživosti merne opreme. Ona dovode do tzv. rasturanja elemenata trajektorije od srednjih vrednosti.

U prvom delu rada, u skladu sa modelom kretanja i teorijom popravki, potrebno je odrediti sistemska odstupanja kroz analizu karaktera uzroka koji dovode do poremećaja, odnosno utvrđivanje uticaja sistematskih odstupanja. Na osnovu razvijene metode omogućiti kompenziranje uticaja sistematskih odstupanja, odnosno biti u mogućnosti da se konkretne eksperimentalne vrednosti merenja elemenata trajektorije svedu na referentne, odnosno standardne uslove kretanja.

Uticaj na trajektoriju tela projektila razmatraće se u odnosu na tri balistička parametra (balističkog koeficijenta, početne brzine i ugla početne brzine) i grupu meteoroloških parametara (temperatura, pritisak, vetar i dr.). Odstupanja početnih balističkih uslova rezultuje po modelu kretanja tzv. drugom normalnom putanjom. Odstupanja meteoroloških uslova kretanja uslovljava trajektoriju u promenjenim meteorološkim uslovima. Klasični matematički model važi za slučaj promenjenih prizemnih meteoroloških uslova, dok bi se za specifične uticaje vetra, dejstva rotacije Zemlje ili uticaja rotacije tela oko sopstvenog koordinatnog sistema morali

menjati diferencijalne jednačine, odnosno primeniti adekvatan model kretanja.

Odstupanja, koja su analizirana u radu, su konstantna i predstavljaju poremećaje početne brzine δV_0 , ugla nagiba vektora početne brzine $\delta\theta_0$, horizontalnog ugla $\delta\psi_0$, balističkog koeficijenta δC , konstantnih vrednosti uzdužnog W_x i poprečnog W_z vetra, temperature atmosfere $\delta\tau_0$. Pretpostavka modela je i da se vrednosti pritiska p_0 i temperature τ_0 menjaju sa visinom.

Druga grupa odstupanja uslova kretanja su promenljivi poremećaji, kao što je uticaj rotacije Zemlje i nisu deo istraživanja ovog rada.

Uticaj svih poremećaja na odstupanje elemenata trajektorije je nelinearan. U radu se pretpostavlja da postoje uslovi kada se određena nelinearna odstupanja mogu linearizovati, što zavisi od veličine poremećaja i osetljivosti elemenata trajektorije na taj poremećaj. Dakle, razmatraju se mali poremećaji, što odstupanja elemenata čini linearnim, odakle će biti primenjene sledeće pretpostavke, koja su u modelu proračuna sistematskih odstupanja:

- uticaj malog poremećaja na elemente trajektorije je proporcionalan veličini tog poremećaja i,
- uticaj više različitih poremećaja jednak je zbiru pojedinačnih poremećaja.

Model proračuna sistematskih odstupanja na osnovu prethodnog može se predstaviti Tejlorovim redom. Ako se elementi trajektorije označe sa funkcijom A ,

$$A = f(P_1, P_2, P_3, \dots, P_n)$$

gde su uslovi koji utiču na kretanje – parametri označeni sa P_1, P_2, \dots, P_n , i predstavljaju navedene uslove kretanja. Odstupanja parametara P_i se označavaju sa δP_i , te sledi,

$$P_1 = P_{10} + \delta P_1, P_2 = P_{20} + \delta P_2, \dots, P_n = P_{n0} + \delta P_n.$$

Odstupanja elemenata trajektorije su označena sa δA . Primenom Tejlorove formule dobija se,

$$A_1 - A_0 = \delta A = \frac{\partial A}{\partial P_1} \delta P_1 + \frac{\partial A}{\partial P_2} \delta P_2 + \dots + \frac{\partial A}{\partial P_n} \delta P_n$$

Prema tome, odstupanja elemenata trajektorije, zbog specifičnih perturbacija je,

$$\delta V_0, \delta C, \delta\theta_0, \delta\tau, \delta p, \delta W_x$$

odnosno odstupanje krajnje apscise trajektorije (dometa),

$$\delta X = \frac{\partial X}{\partial C} \delta C + \frac{\partial X}{\partial V_0} \delta V_0 + \frac{\partial X}{\partial \theta_0} \delta \theta_0 + \frac{\partial X}{\partial \tau} \delta \tau + \frac{\partial X}{\partial p} \delta p + \frac{\partial X}{\partial W_x} \delta W_x$$

odnosno odstupanje vremena leta,

$$\delta T = \frac{\partial T}{\partial C} \delta C + \frac{\partial T}{\partial V_0} \delta V_0 + \frac{\partial T}{\partial \theta_0} \delta \theta_0 + \frac{\partial T}{\partial \tau} \delta \tau + \frac{\partial T}{\partial p} \delta p + \frac{\partial T}{\partial W_x} \delta W_x.$$

Predstavljene veličine u izrazima,

$$\frac{\partial X}{\partial C} \quad \frac{\partial X}{\partial \theta} \quad \frac{\partial X}{\partial V_0}$$

predstavljaju diferencijalne koeficijente određenog elementa (dometa) u odnosu na uticajne parametre, kao što su balistički uslovi. U referentnim zbornicima o konkretnim sistemima naoružanja, određene su vrednosti odstupanja elemenata pod uticajem predefinisanih iskustvenih vrednosti poremećaja uslova kretanja, [9,10].

Metode određivanja diferencijalnih koeficijenata primenjenih u radu se zasnivaju na metodi razlika, [2,7,8]. Diferencijalni koeficijenti su parcijalni izvodi elemenata trajektorije A , po određenom parametru P . Izvod se po metodi predstavlja količnikom dovoljno male promene veličine A i odgovarajuće promene parametra P ,

$$\frac{\partial A}{\partial P} = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta P}.$$

Ako parametru P_0 odgovara nominalna vrednost elementa trajektorije $A(P_0)$, i ako se odredi $A(P_0 + \Delta P)$ i $A(P_0 - \Delta P)$, diferencijalni koeficijent se može dobiti pomoću Tejlrove formule,

$$A(P_0 + \Delta P) = A_0 + \frac{\partial A}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial^2 A}{\partial P^2} \Delta P^2 + \dots$$

$$A(P_0 - \Delta P) = A_0 - \frac{\partial A}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial^2 A}{\partial P^2} \Delta P^2 + \dots$$

odnosno diferencijalni koeficijent je dat izrazom,

$$\frac{\partial A}{\partial P} = \frac{A(P + \Delta P) - A(P - \Delta P)}{2\Delta P}$$

sa greškom $O(\Delta P)^2$, [1,2].

Parametar P se menja, dok su ostali parametri nepromenjeni, čime se zadovoljava uslov parcijalnog izvoda. Metoda omogućava određivanje diferencijalnih koeficijenata za bilo koji parametar na osnovu primenjenog proračuna modela leta projektila.

Metod određivanja slučajnih odstupanja elemenata trajektorije predstavlja procenu verovatnih odstupanja uslova kretanja u odnosu na iskustvene podatke. Matematička interpretacija statističkih odstupanja trajektorije je uslovljena, pored navedenog i vrednostima i karakterom diferencijalnih koeficijenata određenih modelom kretanja materijalne tačke.

Mere slučajnih odstupanja su opisane u radu sa tzv. verovatnim skretanjima, u odnosu na lokalne koordinatne ose

vezane za Zemlju u mestu lansiranja tokom ispitivanja, odnosno simulacije leta.

Verovatno skretanje (V_s) je veličina koja je po svojoj apsolutnoj vrednosti veća od bilo kog skretanja od srednjeg pogotka jedne tzv. bolje polovine pogodaka, a manja od bilo kog skretanja druge polovine svih pogodaka, [1]. Prema definiciji, polovina svih pogodaka će se naći u granicama od $-V_s$ do $+V_s$. Verovatnim skretanjem karakteriše se pored veličine površine rasturanja i procentualni raspored pogodaka na toj površini.

Prema normalnom Gausovom zakonu, osam verovatnih skretanja ($\pm 4V_s$) sadrži 99,3% pogodaka. U praksi se usvaja da te granice predstavljaju $\approx 100\%$ slike rasturanja. U izuzetnim slučajevima, pri analizi preciznosti može se računati sa 10 ($\pm 5V_s$) do 12 ($\pm 6V_s$) verovatnih skretanja, kojima se teorijski obuhvata do 99,9% slike rasturanja pogodaka.

Za označavanje verovatnih skretanja po visini, pravcu i daljini koriste se simboli V_v , V_p i V_d . Verovatno skretanje izračunava se prema,

$$V_i = 0,6745 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j^2}{n-1}}$$

gde su,

$$\lambda_x = (\bar{x} - x_i), \quad \lambda_y = (\bar{y} - y_i).$$

Model određivanja verovatnih skretanja primenjen u radu, predstavlja procenu verovatnih skretanja, na osnovu rezultata ispitivanja sistematskih odstupanja, obuhvaćena simulacijom leta sa modelom kretanja materijalne tačke.

Odstupanje elemenata trajektorije projektila je razmatrana na osnovu perturbacija – odstupanja uslova,

- balističkih parametara V_0 , θ_0 , C i m ,
- meteoroloških uslova leta, τ_0 , W_x , W_z .

Deo uticaja koji se odnosi na perturbacije uslovljene konstruktivnim nesavršenostima projektila (koje prouzrokuju statičku i dinamičku neuravnoteženost i ekscentričnost reaktivne sile), kao i nesavršenosti sistema naoružanja i projektila koje daje početne poremećaje, nisu bili obuhvaćeni istraživanjem. U granicama malih promena osnovnih veličina izrazi za verovatna odstupanja su po osama,

- uzdužna – po daljini

$$V_d = \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial V_0} r_{V_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial c} r_c\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial \theta_0} r_{\theta_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial p} r_p\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial m} r_m\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial t_N} r_{t_N}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial t_M} r_{t_M}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial W_x} r_{W_x}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial W_{x_a}} r_{W_{x_a}}\right)^2 + \dots}$$

- vertikalna – po visini

$$V_v = \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial V_0} r_{V_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial c} r_c\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial \theta_0} r_{\theta_0}\right)^2}$$

- bočna – po pravcu

$$V_p = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial \Psi_0} r_{\Psi_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial W_Z} r_{W_Z}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial W_{Za}} r_{W_{Za}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Z_d} r_{Z_d}\right)^2 + \dots}$$

U navedenim jednačinama su diferencijalni koeficijenti,

$$\frac{\partial X}{\partial V_0}, \frac{\partial X}{\partial c}, \frac{\partial X}{\partial \theta_0}, \dots, \frac{\partial X}{\partial W_x}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \Psi_0}, \frac{\partial Z}{\partial W_Z}, \frac{\partial Z}{\partial W_{Za}}, \frac{\partial Z}{\partial Z_d}$$

i verovatna odstupanja početnih uslova leta,

- r_{V_0} – srednje očekivano odstupanje početne brzine,
- r_C – srednje očekivano odstupanje balističkog koeficijenta,
- r_{θ_0} – srednje očekivano odstupanje polaznog ugla,
- r_m – srednje očekivano odstupanje mase projektila,
- r_{W_x} – srednje očekivano odstupanje uzdužnog vetra,
- r_{W_z} – srednje očekivano odstupanje bočnog vetra,
- r_{Ψ_0} – srednje očekivano odstupanje horizontalnog polaznog ugla (pravca) i
- r_{Z_d} – srednje očekivano odstupanje zbog derivacije.

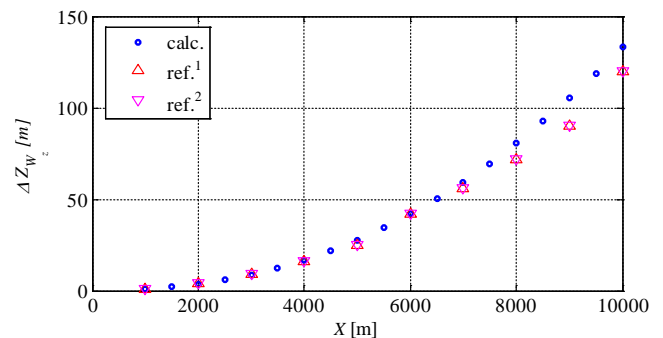
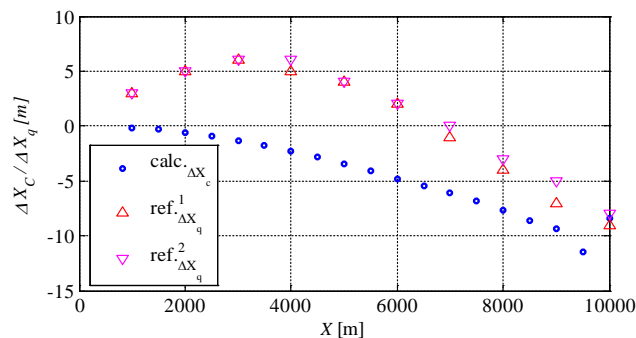
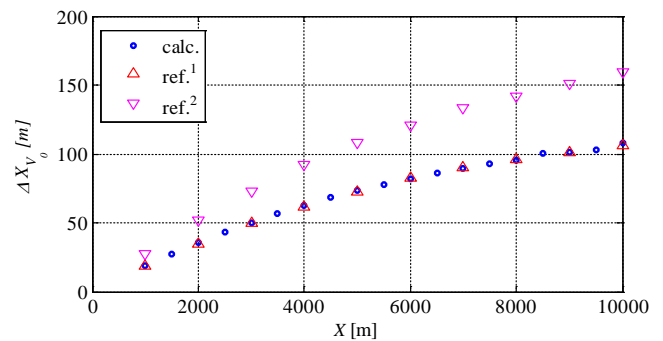
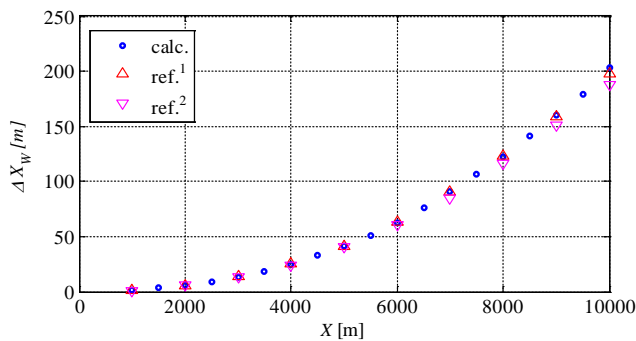
Vrednosti verovatnih odstupanja u istraživanju su usklađena sa definisanim verovatnim odstupanjima, prema podacima eksperimentalnih ispitivanja, datim u tablicama gađanja, [9,10], dati u tabeli 1.

III. REZULTATI

Istraživanje je realizovano na modelu tela projektila dužine oko 5 referentnih kalibara i mase oko 20 kg, po uzoru na realne modele. Aerodinamički model tela se sastoji od prednje sekcije oživalnog oblika, cilindričnog srednjeg dela i zadnje sekcije oblika zarubljenog konusa. Poluemprijski proračun linearne aerodinamike je za potrebe rada upotrebljen za određivanje aerodinamičkog koeficijenta aksijalne sile pri osnosimetričnom strujanju za sva tri strujna režima. Navedena predikcija je omogućila određivanje koeficijenta oblika i određivanje proračunske nominalne vrednosti balističkog koeficijenta, u odnosu na etalon zakona otpora vazduha.

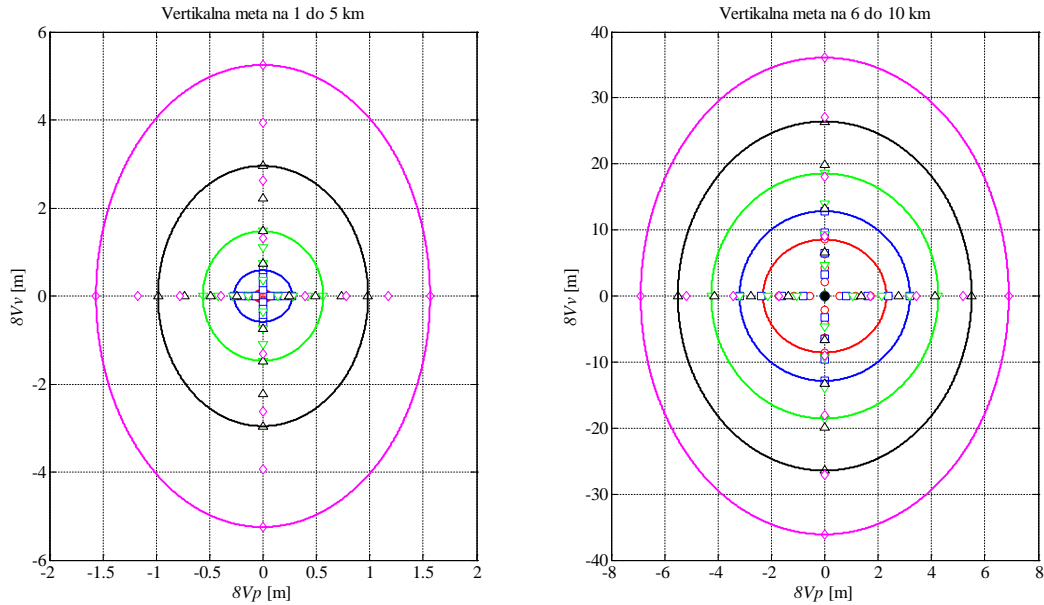
TABELA 1 VREDNOSTI VEROVATNIH ODSUPANJA

Oznaka	Veličine i vrednosti verovatnih odstupanja početnih uslova kretanja primenjenih u modelu		
	veličina verovatnog odstupanja	jedinica	vrednost
r_{V_0}	početna brzina	%	1
r_{θ_0}	polazni vertikalni ugao	mrad	12
r_{Ψ_0}	polazni horizontalni ugao	mrad	12
r_m	masa tela	%	0,3
r_C	balistički koeficijent	-	0,002
r_{W_x}	uzdužni intenzitet vetra	m/s	10
r_{W_z}	bočni intenzitet vetra	m/s	10

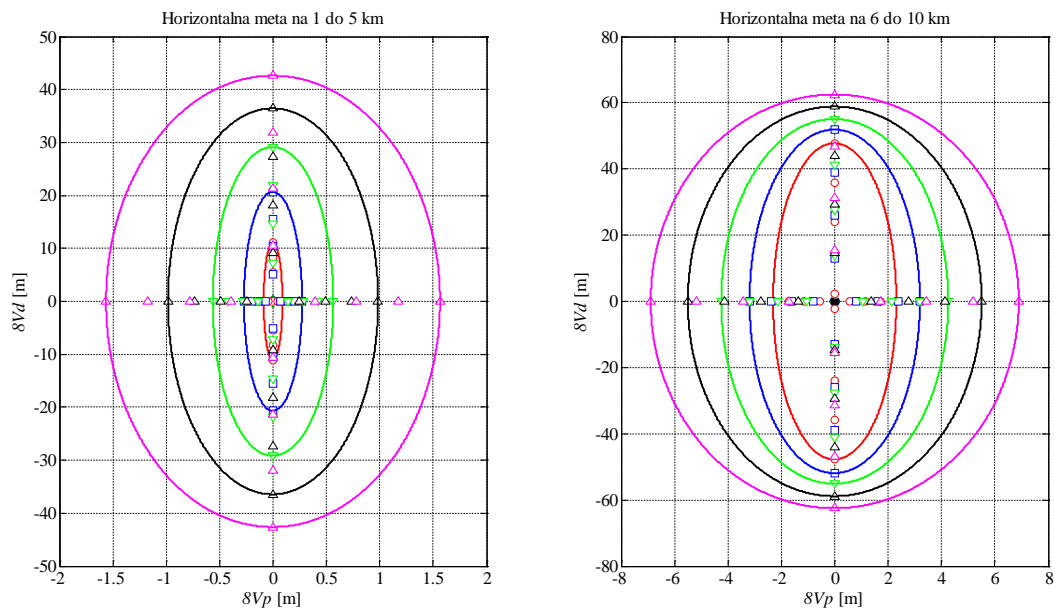


Sl. 1. Sistematska odstupanja trajektorije u funkciji krajnje apscise trajektorije

Na osnovu programskog rešenja, za definisane uslove kretanja i verovatna – srednja očekivana odstupanja, određene su vrednosti sistematskih odstupanja u zavisnosti od krajnje apscise putanje. Rezultati su prikazani na slici 1. Vrednosti sistematskih odstupanja određenih na osnovu metode razlika modelom kretanja, predstavljene su na dijagramima oznakom (calc.), slika 1. Izvršena je uporedna analiza proračunskih sistematskih odstupanja u odnosu na dva referentna izvora podataka – tablica gađanja, (ref.¹), prema [10], odnosno (ref.²), prema [9], dobijenih na osnovu eksperimentalnih ispitivanja. Pokazan je saglasan karakter promena i nivo određenih vrednosti veličina.



Sl. 2. Slika rasturanja u vertikalnoj ravni na različitim rastojanjima



Sl. 3. Slika rasturanja u horizontalnoj ravni na različitim rastojanjima

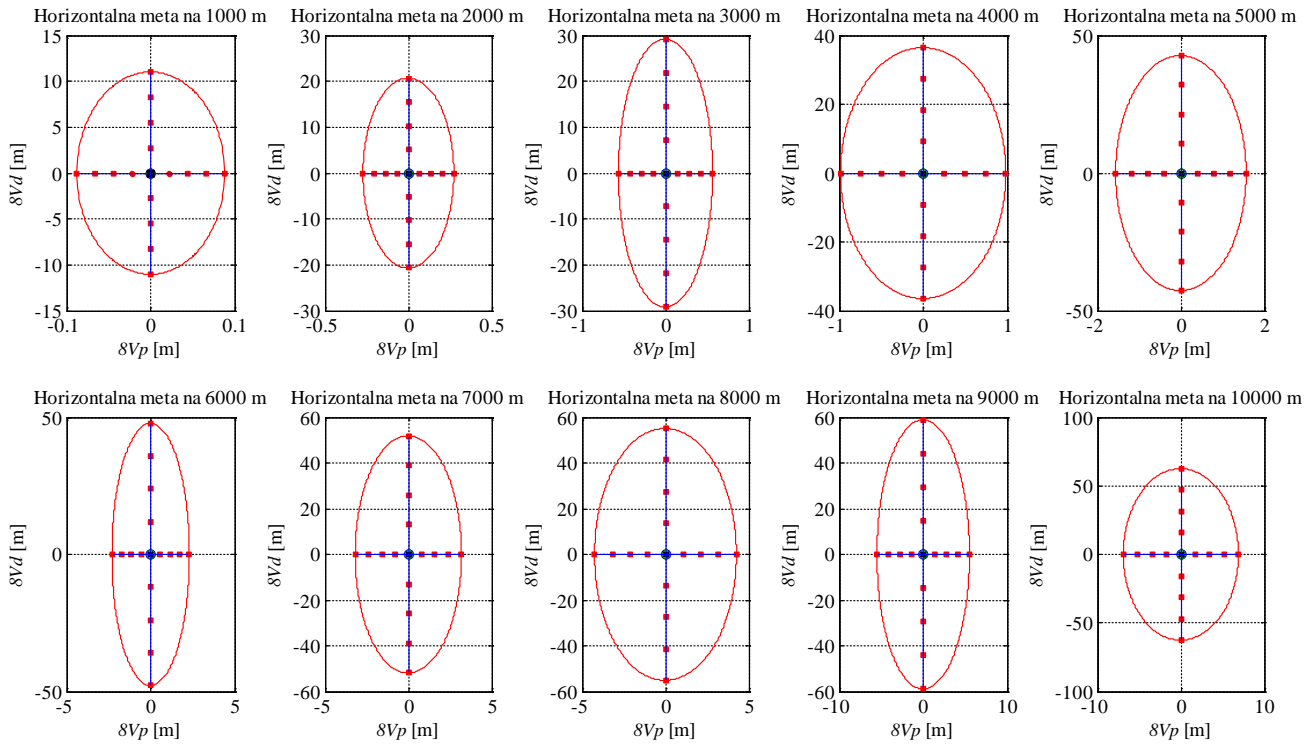
Nakon ocene i analitički potvrđenih vrednosti sistematskih odstupanja, izvršeno je određivanje slučajnih odstupanja, u vidu procene verovatnih skretanja u odnosu na definisane ose orijentacije kretanja tela. Proračun je zasnovan na predstavljenim jednačinama za izračunavanje verovatnih skretanja i u skladu sa procenjenim vrednostima verovatnih odstupanja uslova – poremećaja parametara.

Data je karakteristična slika rasturanja, mera slučajnih odstupanja na različitim rastojanjima od 1 do 10 km, prema rezultatima proračuna procene slučajnih odstupanja u istraživanju.

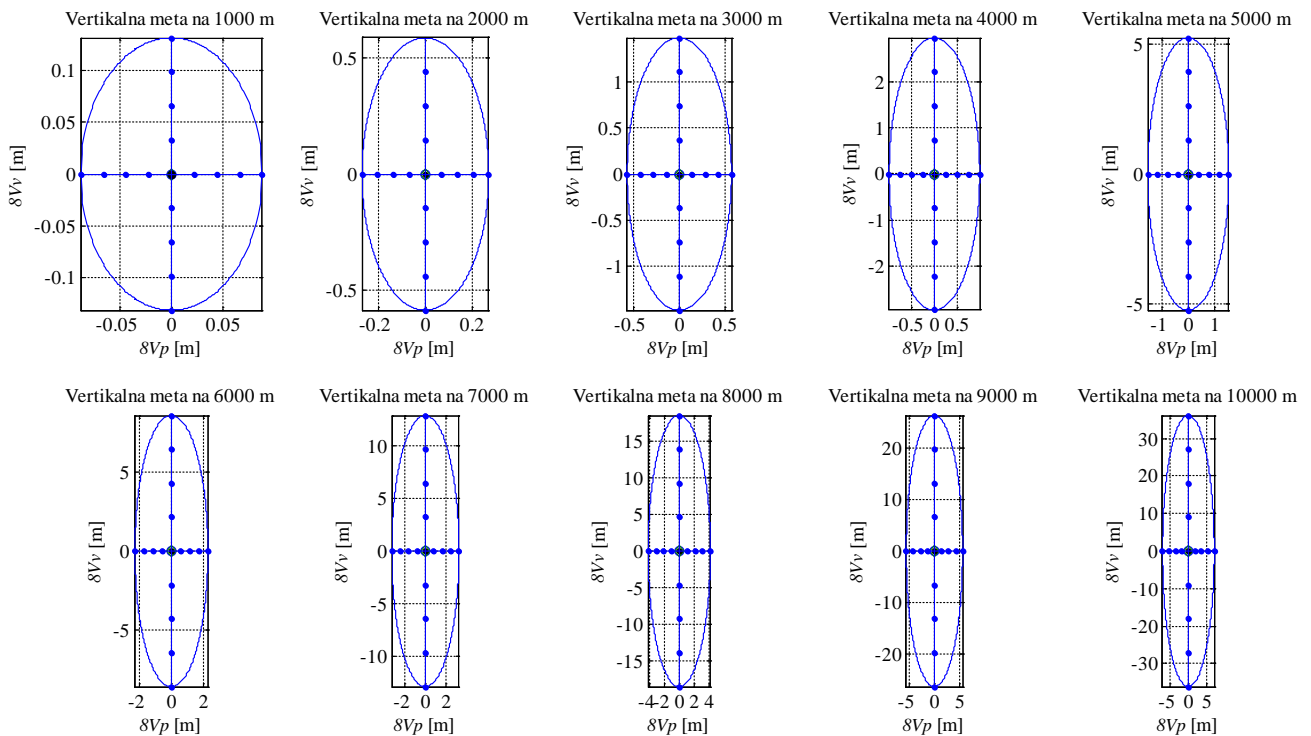
Na slikama 4 i 5 predstavljena su procenjena slučajna odstupanja, u obliku slike rasturanja svih pogodaka, na vertikalnoj i horizontalnoj ravni. Slike obuhvataju teoretskih 99,3% pojava ($8Vs$), predstavljenih sa po četiri verovatna

skretanja u oba pravca duž ose ($-4Vs$ do $+4Vs$), za svaku od veličina: po daljini $8Vd$, po pravcu $8Vp$ i po visini $8Vv$.

Na slici 4 date su slike rasturanja sa pojedinačnim Vs , na horizontalnoj meti, odnosno na slici 5 na vertikalnoj meti.



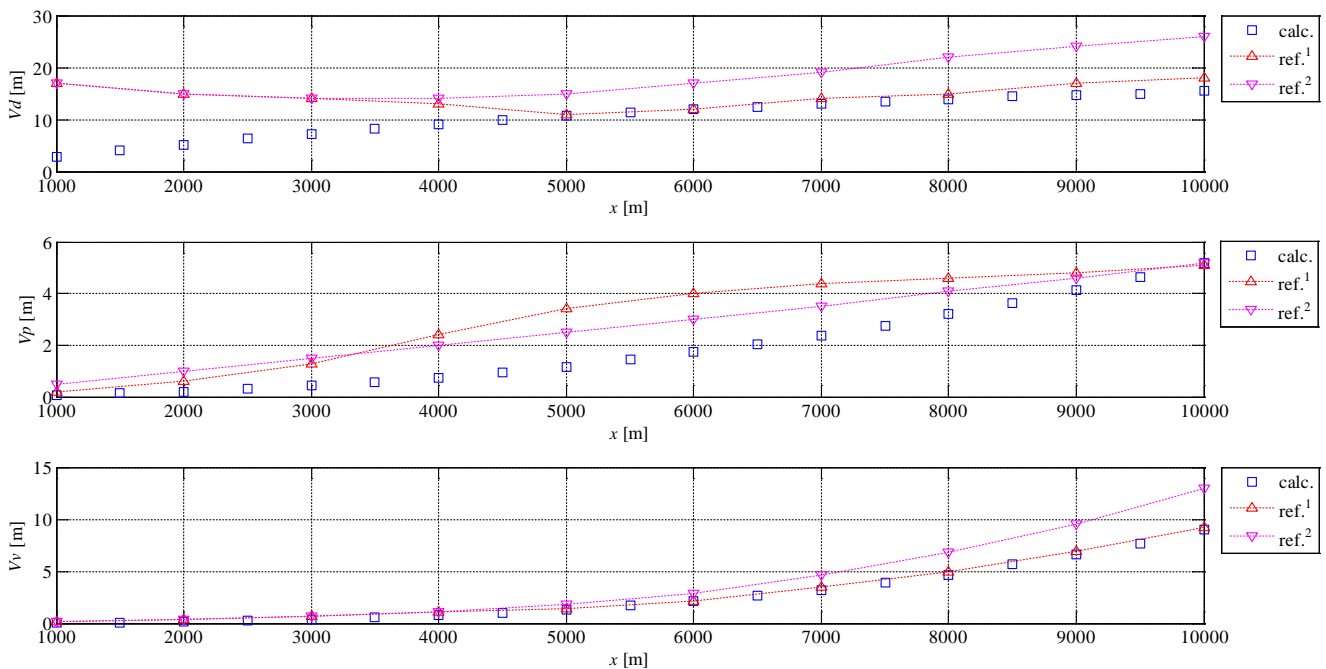
Sl. 4. Sistemska odstupanja trajektorije u funkciji krajnje apscise trajektorije



Sl. 5. Slike rasturanja na vertikalnoj meti

Radi ocene dobijenih vrednosti slučajnih odstupanja, predstavljenih verovatnim skretanjima, izvršena je uporedna analiza dobijenih rezultata u odnosu na referentna istraživanja i publikovane rezultate, [7,8,9,10].

Na slici 6 date su uporedno rezultati određenih verovatnih skretanja po osama u odnosu na domet leta, po visini V_v , pravcu V_p i daljini V_d . Rezultati istraživanja označeni su sa (calc.), a eksperimentalno referentnih rezultata sa (ref.¹, ref.²).



Sl. 6. Slučajna odstupanja po osama kretanja u odnosu na krajnju apscisu leta

IV. ZAKLJUČAK

Simulacija leta primenjenim modelom kretanja, sa varijacijom pojedinačnih uslova kretanja, kao način rešavanja odstupanja parametara leta, omogućila je određivanje kvalitetnih vrednosti sistematskih odstupanja trajektorije. To je pokazano vrednostima i karakterom diferencijalnih koeficijenata određenih predstavljenim modelom, u odnosu na referentne rezultate eksperimentalno primenjenih istraživanja.

Vrednosti sistematskih odstupanja trajektorije određenih modelom, te na osnovu toga izračunatih vrednosti slučajnih odstupanja, omogućile su vizuelni prikaz slike slučajnih odstupanja, predstavljene elipsom rasturanja u ravnima. Veličine verovatnih skretanja, mera slučajnih odstupanja, za različita rastojanja u odnosu na referentne rezultate, pokazali su nivo odstupanja, koji je jednim delom i očekivan, a s druge strane omogućuje pouzdanu okvirnu procenu mera preciznosti. Ovo je značajno u projektnoj i istraživačkoj fazi istraživanja, jer omogućava da se na brz način, u početnom delu, procene krajnji ishodi razvoja specifičnih borbenih sistema naoružanja i projektila.

Očekivana odstupanja potiču, jednim značajnim delom od jednostavnosti matematičkog modela kretanja tela, koji posmatra kretanje materijalne tačke u jednoj ravni. Procena odstupanja u odnosu na druge dve ravni projekcijom na njih je deo aproksimacije modela proračuna, te se smatra nedovoljno preciznim. Model leta, pa ni modeli određivanja kako sistematskih, tako i složenijih slučajnih odstupanja, ne uzimaju u obzir posebno značajne tranzicione i dinamičke poremećaje

na početnom delu trajektorije, odnosno model ne sadrži jednačine, kojima bi se ti poremećaji matematički opisali.

Na bazi ocene veličina i karaktera određenih sistematskih odstupanja i procenjenih verovatnih odstupanja trajektorije, predstavljenim u radu, potrebno je izvršiti unapređenja modela proračuna radi povećanja pouzdanosti za završne faze istraživanja i razvoja. Model bi u osnovi bio razvijen sa složenijim i proračunski zahtevnijim modelom kretanja i varijacijama uslova kretanja. Očekivani rezultati takvog modela bi bili većeg nivoa pouzdanosti, ali bi u potpunosti morali biti provereni i potvrđeni eksperimentalnim istraživanjima.

LITERATURA

- [1] D. Regodić, "Spoljna balistika," Vojna akademija, Beograd, 2007, pp. 251-295.
- [2] D. Regodić, "Zbirka rešenih zadataka iz spoljne balistike," Vojna akademija, Beograd, 2003., pp. 253-273.
- [3] Regodić, D., "Uticaj vrste strujanja na ukupni aerodinamički koeficijent", Vojnotehnički glasnik, Br. 1/1995, Beograd, 1995.
- [4] D. Jerković, D. Regodić, "Uticaj aerodinamičkih koeficijenata na elemente putanje klasičnog projektila", Vojnotehnički Glasnik, april – jun 2011, Broj 2, pp.5-28, Ministarstvo Odbrane Republike Srbije, Beograd
- [5] Jovanović S., Jerković D., Regodić D., "Određivanje aerodinamičkih koeficijenata za projektil kalibra 122 mm", pp. I 74 – 76, I naučni skup OTEH 2005, Beograd, Vojna akademija.
- [6] Jerković D., Samardžić M., The aerodynamic characteristics determination of classic symmetric projectile, pp. 275 – 282 of Proceedings, 5th International Symposium about design in mechanical engineering, KOD 2008, Novi Sad

- [7] Regodić D., Jerković D., Savić D., "Standardna spoljnobalistička ispitivanja", pp. 617-620 zbornika, XXXIII simpozijum o operacionim istraživanjima, SYM-OP-IS 2006, Banja Koviljača.
- [8] Regodić D., Jerković D., Savić D., "Opšti model obrade rezultata spoljnobalističkih ispitivanja", pp. 613 – 616 zbornika, XXXIII simpozijum o operacionim istraživanjima, SYM-OP-IS 2006, Banja Koviljača.
- [9] Tablice gađanja Haubica 122 mm D30J, VIZ, Beograd, 1997. (ref.²)
- [10] Таблицы стрельбы 122-мм Гаубицы Д-30, МО СССР, Москва (ref.¹)
- [11] Regodić D., Jerković D., Andrejević I., „Rešavanje sistema diferencijalnih jednačina leta projektila primenom metode modifikovane materijalne tačke“, pp. 131-139, XXII simpozijum o eksplozivnim materijama, 20. – 21. oktobar 2004. Bar (Tivat)