

O taktici gašenja i analizi stabilnosti helikoptera opremljenog vodenim topom

The tactics of firefighting and stability analysis of helicopters equipped with water cannon

Danijel Vuković, dipl. ing.
prof. dr. sc. Milan Vrdoljak
Josip Rašić, dipl. ing.

SAŽETAK

Gašenje požara sustavom vodenog topa pokazuje se pouzdanim u urbanim ili teže dostupnim područjima gdje se zahtijevaju precizna djelovanja vodom. Zbog ukupnih tehničkih i operativnih značajki sustava helikoptera i vodenog topa, razvijeno je nekoliko različitih taktika za gašenje određene vrste požara. Ovisno o režimu rada vodenog topa na helikopter djeluju trenutne i kontinuirane sile (impulsi) čiji momenti utječu na ukupne performanse helikoptera te mogu dovesti do ugrožavanja sigurnosti letenja. Tijekom rada topa u različitim taktičkim uvjetima gašenja može doći do narušavanja stabilnosti i kvalitete upravljanja helikoptera. Primjenom linearnog modela helikoptera s vodenim topom analiziran je utjecaj vodenog topa s impulsnim i kontinuiranim mlazom na dinamiku helikoptera.

Ključne riječi: vodeni top, linearni model gibanja helikoptera, stabilnost helikoptera, taktika gašenja požara iz zraka

Summary

Fire extinguishing with system of water cannon is proved very reliable in urban or remote areas as well as on the ships at sea, where precise water action is required. Because of the overall both technical and operational features of helicopter and water cannon, several different tactics for firefighting are developed and practiced. Depending on the mode of the water cannon operation, on a helicopter may act both impulse and continually developed forces and moments which affect the overall performance of the helicopter and can lead to degradation of flying safety. While working in a variety of tactical conditions, water cannon may additionally cause degradation of stability and handling quality of helicopter.

Helicopter equipped with water cannon firefighting tactics

Danijel Vuković, dipl.ing. GS 05 RH, HKoV, Zapovjedništvo za obuku i doktrinu "Fran Krsto Frankopan", Pukovnja PZO, dani.flanker@gmail.com
prof. dr. sc. Milan Vrdoljak, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za zrakoplovstvo, milan.vrdoljak@fsb.hr
Josip Rašić, dipl. ing. GS 05 RH, HRZ i PZO, Eskadrila višenamjenskih helikoptera, josip.rasic@gmail.com

may be out of position from hovering or progressive flight. Generally, water cannon may be able to shift both in azimuth and in elevation. Installation of a cannon on a helicopter can be done in two ways - under the helicopter fuselage parallel to its longitudinal axis or inside the passenger or cargo space when the cannon is mounted sideways.

Applying a linear model of helicopter with a water cannon, the effect of a water cannon with impulse and continuously jet on helicopter is analyzed. The mathematical analysis of stability will be considered on generic transport helicopter with a conventional configuration, which is equipped with single-tube water cannon mounted on the longitudinal axis of the helicopter and in both impulse and continuously jet action regimes.

Keywords: water cannon, linear model of helicopter motion, stability of the helicopter, firefighting tactics from the air

UVOD

Introduction

Uporaba vodenog topa na helikopterima najčešće se primjenjuje za gašenje požara na visokim zgradama u urbanim područjima (slike 1. i 2.). Prisustvo i rad vodenog topa na helikopteru mijenja njegove ukupne inercijalne, aerodinamičke i upravljačke značajke te se u pravilu nastoji izvesti ugradnja topa i popratnih uređaja na način da spomenute značajke u što manjoj mjeri utječu na stabilnost i upravljanje helikopterom. Ugradnjom topa i njegovih sustava na i u helikopter u inercijalnom smislu podrazumijeva dodavanje mase i pomicanje težišta helikoptera. Takav novi sustav sastavljen od helikoptera i sustava vodenog topa imat će drukčije performanse i značajke upravljanja u odnosu na sami helikopter. Promjena aerodinamičkih značajki vidljiva je u povećanju otpora sustava helikopter i vodeni top u odnosu na helikopter bez topa. Stabilnost helikoptera narušena zbog utjecaja kontinuiranog vodenog mlaza ili vodenog projektila može dovesti do degradacije kvalitete upravljanja helikopterom te u konačnici narušiti i sigurnost leta. Način postizanja vodenog projektila je baziran na principu ubrzavanja (komprimiranim zrakom) i izbacivanja određene količine vode kroz izlazni presjek cijevi vodenog topa. Pritom dolazi do razvoja reaktivne sile koja se može, ukoliko je potrebno, neutralizirati elastičnom vezom između helikoptera i vodenog topa. U analizi prikazanoj u ovom radu pretpostavlja se kruta veza između helikoptera i vodenog topa.

Slika 1. Primjer gašenja požara helikopterom s vodenim topom s kontinuiranim mlazom na visokom i teže dostupnom objektu

Figure 1. An example of helicopter firefighting with continuous jet water cannon application on high and remote objects



Slika 2. Primjer gašenja požara helikopterom s impulsnim vodenim topom u urbanom području

Figure 2. An example of helicopter firefighting with impulse water cannon application in urban environment



Ovisno o tipu i konstrukcijskim značajkama helikoptera i topa, potrebno je razraditi jedinstveni projekt instalacije i integracije vodenog topa. Na slici 3. prikazan je ruski helikopter Kamov Ka-32A s jedinstvenom izvedbom instalacije vodenog topa. Instalacija topa podrazumijeva konstrukcijske zahvate fizičkog povezivanja helikoptera i topa. Pritom se vodeni top može smjestiti pod trup ili pak bočno na trup helikoptera. Također, vodeni top može biti smješten i u transportno/teretnom prostoru helikoptera

Slika 3. Vodeni top za gašenje požara instaliran na helikopteru Ka-32A

Figure 3. Firefighting water cannon installed on Ka-32A helicopter



te u takvom slučaju s istim djeluje bočno. Svaka pojedina izvedba odlikuje se određenim operativnim prednostima i nedostacima te se sukladno istima definiraju i primjenjuju različite tehnike gašenja požara helikopterom opremljenim vodenim topom.

Dok se tehnika kontinuiranog mlaza koja se sastoji od spremnika vode, pumpe i vatrogasne tlačne cijevi koristi dugi niz godina, impulsna tehnika se primjenjuje u posljednjih 20-ak godina i predstavlja relativno novi pristup u načinu, učinkovitosti i taktici gašenja požara iz helikoptera (IFEX 2011.), te se zbog toga i detaljnije obrađuje u ovom radu. Kontinuirani mlaz stvorit će kontinuirano razvijenu silu na osi vodenog topa koja reaktivno djeluje na helikopter u smjeru suprotnom od gibanja mlaza. U pravilu će pilot imati više vremena i lakše će reagirati u kompenzaciji poremećajne sile i momenta nastale pod djelovanjem kontinuiranog mlaza, nego u situaciji impulsnog djelovanja kada u kratkim vremenskim intervalima dolazi do pojave sila visokih amplituda.

IMPULSNA TEHNIKA IZBACIVANJA VODENOG PROJEKTILA – *Impulse ejection of the water projectile*

Impulsna tehnika podrazumijeva postojanje manje količine vode pripremljene u komori topa kao vodenog projektila koji se pod velikim pritiskom i velikom brzinom izbacuje vani. Dinamički učinci vodenog projektila vidljivi su u sposobnostima probijanja određenih prepreka (npr. razbijanje prozorskoga stakla) te velikoj količini gibanja kojom se postiže veći učinak gašenja s manje količine vode. Nadalje, učinkovitost ovakvog gašenja zasniva se i na istovremenoj apsorpciji topline i gašenju vatre zbog trenutnog sprječavanja dotoka okolišnjeg zraka uslijed velike pokrivenosti i raspršenosti vode (veličina kapljica od 50 do 100 mikrona). Prednosti gašenja impulsnom tehnikom su sljedeće:

- gašenje manjih požara je trenutno,
- usmjeravanje vode je precizno,
- dovoljna je mala količina vode pa su štete prouzročene gašenjem minimalne,
- mogu se gasiti jako zapaljivi materijali,
- omogućen je brzi pristup požarištu zbog smanjenja temperature.

TAKTIKA GAŠENJA POŽARA NA VISOKIM I TEŽE DOSTUPNIM OBJEKTIMA HELIKOPTEROM S VODENIM TOPOM – *Firefighting tactics on high and remote objects with the helicopter equipped with water cannon*

Pojava požara na visokim objektima zahtijeva poseban oblik zračne protupožarne intervencije kojom je moguće isporučiti određenu količinu protupožarnog agensa s određenom preciznošću. Pritom je bitan i određeni kontinuitet preciznog djelovanja po samoj jezgri požara. Već se iz ovih temeljnih definicija zračnog protupožarnog djelovanja može vidjeti kako će se za precizno protupožarno djelovanje zahtijevati, prije svega, posebni precizni tlačni sustavi za isporuku protupožarnog agensa, zatim helikopteri s naprednim sustavima upravljanja i stabilizacije, kvalificirano letачko i tehničko osoblje te posebno razvijeni

taktički operativni postupci.

Opća podjela taktike gašenja požara na visokim objektima može se podijeliti u tri kategorije prema:

1. Načinu približavanja, odnosno 'napadanja' požarnog područja – razlikuje se po načinu na koji se helikopter približava požaru na visokom objektu,
2. Načinu smještaja i nošenja sustava za gašenje požara na helikopteru,
3. Načinu djelovanja protupožarnog sustava.

AD 1.

Postoje dva praktična načina kako se helikopter može približavati, tj. 'napadati' požarno područje na visokim objektima - frontalno i bočno. Frontalni pristup je općepoznati i primjenjuje se u gašenju šumskih požara. U frontalnom napadanju pilot je u mogućnosti sam djelovati protupožarnim sustavom, što je prihvatljivije u pogledu brzine djelovanja. U ovakvom prilazu pilot dovodi helikopter u zonu požara te mora posebnu pažnju posvetiti mogućoj degradaciji njegovih performansi. Stanje atmosfere iznad požarišta je karakterizirano smanjenjem gustoće s porastom temperature u odnosu na uvjete standardne atmosfere. Sa smanjenjem gustoće opada i pogonska sila na disku rotora, odnosno uzgonska sila, što može rezultirati ugrozom sigurnosti letenja helikoptera (Vuković et al., 2010). Izbjegavanje ulaska u požarnu zonu u ovoj taktici je otežano. Ovaj način nije dovoljno učinkovit za gašenje požara na visokim objektima jer može prouzročiti više štete i dovesti u opasnost ljudske živote.

Bočno napadanje se može smatrati novom taktikom preuzetom iz vojne primjene helikoptera kojom se omogućuje preciznije pozicioniranje helikoptera u blizini požarnog područja te je na raspolaganju više vremena za ciljanje protupožarnim sustavom. No, ovdje pilot nije u mogućnosti sam izvoditi djelovanje gašenja požara te se zahtijeva prisutnost dodatnog operatera. U primjeni taktike bočnog prilaženja omogućeno je jednostavno udaljavanje helikoptera od zone požara čime se izbjegava rizično zadržavanje u uvjetima kontaminirane atmosfere u okolini požara.

AD 2.

Po načinu na koji se smješta protupožarni sustav u odnosu na helikopter, razlikuje se vanjski, djelomični i unutarnji smještaj. Osim utjecaja na taktiku gašenja, ova tri načina utječu i na troškove integracije sustava s helikop-

terom. Dodatni zahtjev se postavlja i na brzinu ugradnje i skidanja sustava s helikoptera te na jednostavnost za održavanje i upravljanje od strane operatera sustava. Očigledno je kako se treba primijeniti kompromisno rješenje koje ovisi o konfiguraciji opožarenog područja na visokim objektima, raspoloživom helikopteru i posadi te odabranoj taktici prilaženja požaru i načinu gašenja.

AD 3.

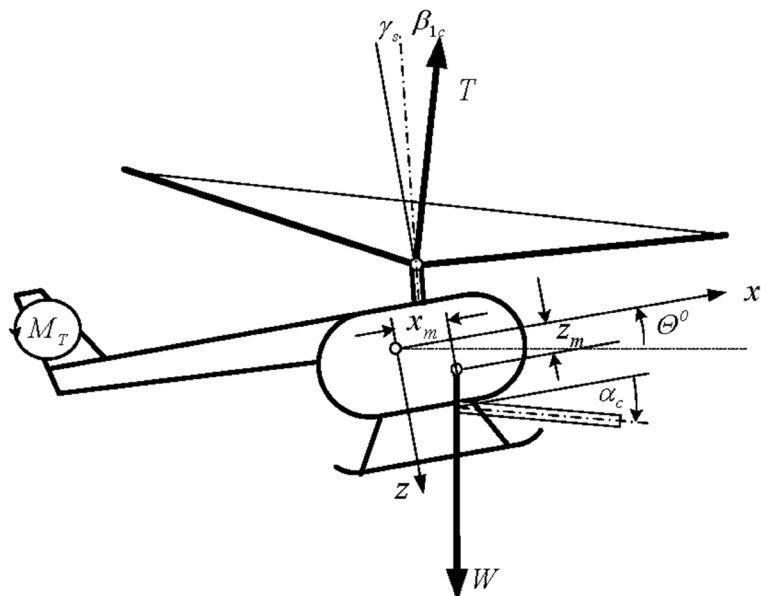
Po načinu djelovanja protupožarnih sustava i načinu izvedbe praćenja (ciljanja), razlikuje se automatsko i ručno. Ovom podjelom također se može ukazati i na definiciju učinkovitosti upravljanja protupožarnim sustavom kojim se uspoređuje učinkovitost korištenja 'umjetne inteligencije' u odnosu na oslanjanje na sposobnosti klasičnog operatera.

ANALIZA STABILNOSTI HELIKOPTERA OPREMLJENOG VODENIM TOPOM – *Analysis of the stability of the helicopter with the water cannon*

U ovom poglavlju će se analizirati pristup i analiza stabilnosti spregnutog sustava helikopter i vodeni top (Vuković et al., 2012). U analizi će se razmatrati generički transportni helikopter s konvencionalnom konfiguracijom, glavni i repni rotor, opremljen jednocjevnim vodenim topom montiranim na uzdužnoj osi helikoptera, u režimu impulsnog i kontinuiranog djelovanja (slika 4).

Slika 4. Geometrija i sile na helikopter s vodenim topom u lebdenju

Figure 4. Geometry and forces on helicopter with water cannon in hover regime



Jednadžbe gibanja helikoptera u lebdenju: za analizu je iskorišten linearni model helikoptera, a utjecaj vodenog topa se razmatra kao linearna perturbacija. Linearizirane jednadžbe oko referentnog ravnotežnog položaja dane su prema (Padfield, 2007):

$$\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{f}(t)$$

U ovom se modelu razmatra samo uzdužno gibanje. Općenito, bočno i uzdužno gibanje je spregnuto zbog sprege uzdužnih i bočnih aerodinamičkih sila i momenata te inercijalnih nesimetričnosti. Razmatrani model primijenjen je na režim lebdenja i pri tome bočno gibanje nije razmatrano, tj. uzdužno gibanje je razdvojeno od bočnog te se vektor stanja \mathbf{x} sastoji od horizontalne u i vertikalne w brzine te kutne brzine q i kuta propinjanja Θ oko osi y :

$$\mathbf{x} = [u \quad w \quad q \quad \Theta]^T$$

Vektor upravljanja \mathbf{u} se sastoji od kolektivnog postavnog kuta θ_0 i uzdužnog cikličnog postavnog kuta θ_{1s} :

$$\mathbf{u} = [\theta_0 \quad \theta_{1s}]^T$$

Matrice \mathbf{A} i \mathbf{B} u sustavu (1) predstavljaju matricu sustava i matricu upravljanja za referentno stanje lebdenja, dok je \mathbf{f} vektor poremećaja sustava.

Za sustav helikoptera s ugrađenim vodenim topom i spremnikom vode mogu se primijeniti gornje jednadžbe, ali treba uzeti u obzir nove geometrijske i inercijalne parametre sustava. Model gibanja helikoptera, analiza ravnotežnog leta, kao i analize utjecaja topa na razmatrani helikopter koji su pregledno dani u nastavku ovog teksta, detaljno su opisani u Vuković et al., 2012.

Impulsni vodeni top i njegov utjecaj na helikopter: Razvijena reaktivna sile u ovom režimu se može neutralizirati elastičnom vezom između helikoptera i vodenog topa ukoliko je potrebno. U ovoj analizi pretpostavlja se kruta veza između helikoptera i vodenog topa.

U ovom primjeru baziramo se na izračun impulsa reaktivne sile F_C i određivanje njezinog učinka na dinamički odgovor helikoptera [Zanenga et al 2010]. Ukupni impuls zraka i vode generiran reaktivnom silom je

$$J_{\text{tot}} = \int_0^{\Delta t} F_C \cdot dt$$

Moment propinjanja zbog reaktivne sile iznosi $M_C = F_C \cdot r_C$

gdje je r_C udaljenost topa od središta mase letjelice. Ovaj moment, na kraju svoga djelovanja, generira kutnu brzinu propinjanja helikoptera:

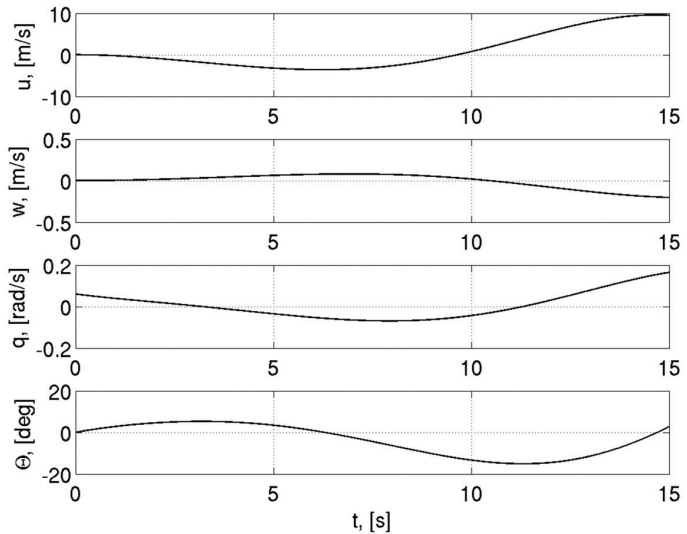
$$q_0 = \frac{1}{I_{yy}} \int_0^{\Delta t} M_C \cdot dt = \frac{J_{tot} r_C}{I_{yy}}$$

Utjecaj djelovanja impulsnog vodenog topa na helikopter kroz model (1) razmatran je kao poremećaj početnih vrijednosti varijabli stanja. Očigledno, početni iznos kutne brzine propinjanja sustava helikoptera bit će jednak q_0 . Početna perturbacija kuta propinjanja je ovdje zanemarena. Za ovaj slučaj vrijednost vektora poremećaja je $\mathbf{f} = 0$. Rezultati opisanog gibanja generičkog transportnog helikoptera (Vuković et al., 2012) prikazani su na slici (5).

Vodeni top s kontinuiranim mlazom i njegov utjecaj na

Slika 5. Rezultati za brzinu, kutnu brzinu i kut propinjanja helikoptera za slučaj impulsnog vodenog topa

Figure 5. Results for velocities, angular velocity and pitch angle in case of water cannon impulse regime



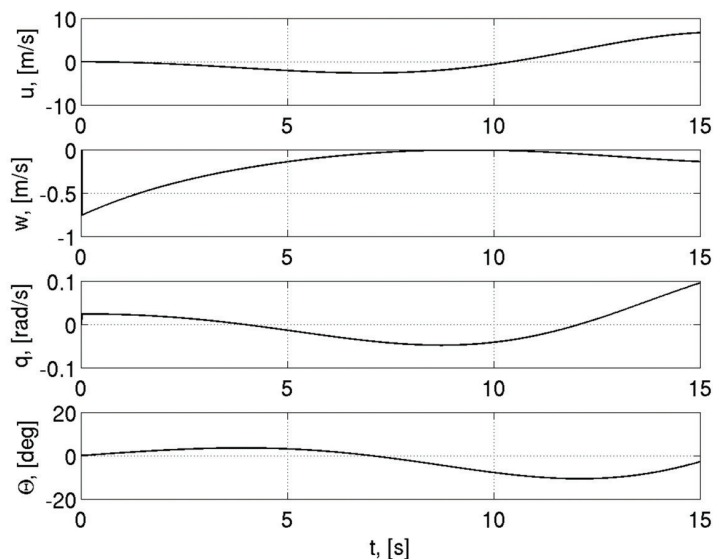
helikopter: U slučaju vodenog topa s djelovanjem kontinuiranog vodenog mlaza stvara se reaktivna sila F_C koja je jednaka umnošku brzine vode i masenog protoka na izlazu iz cijevi. Ova sila i njezin moment M_C razmatrat će se u modelu (1) kao perturbacija, te normalizirane sile i momenti definiraju vektor poremećaja \mathbf{f} :

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} \frac{F_{Cx}}{m} & \frac{F_{Cz}}{m} & \frac{M_C}{I_y} & 0 \end{bmatrix}^T$$

gdje su F_{Cx} i F_{Cz} komponente reaktivne sile u vertikalnoj ravnini. Rezultati opisanog gibanja razmatranog generičkog helikoptera [Vuković et al 2012.] su prikazani na slici (6).

Slika 6. Rezultati za brzine, kutnu brzinu i kut propinjanja za slučaj vodenog topa s kontinuiranim mlazom

Figure 6. Results for velocities, angular velocity and pitch angle in case of water cannon continuously jet regime



Prednosti i nedostaci vodenog topa s impulsnim i kontinuiranim mlazom: Vodeni top s impulsnim djelovanjem ima velike prednosti u gašenju požara na teže dostupnim područjima gdje se zahtijeva brzo i točno djelovanje. Pritom za gašenje vatre koristi znatno manju količinu vode u odnosu na gašenje kontinuiranim mlazom. S druge strane, impulsni vodeni top predstavlja složeni tehnički sustav koji se odnedavno počeo uvoditi u operativnu uporabu na helikopterima te prilikom izbora određenog modela, instalacije i integracije na pojedini tip helikoptera potrebno je obratiti pozornost i analizirati njegov utjecaj na stabilnost helikoptera. Vodeni top s kontinuiranim mlazom pokazuje se pouzdanim kada na teže dostupnim područjima treba obuhvatiti veću opožarenu površinu gdje se ne zahtijeva posebna preciznost djelovanja. Sustav vodenog topa s kontinuiranim mlazom očekivano je financijski jeftiniji od sustava s impulsnim djelovanjem. U konačnici, izbor helikoptera i vodenog topa trebao bi se razmatrati združeno te sukladno statističkim i očekivanim vatrenim ugrozama u urbanim područjima gdje uloga helikoptera kao platforme s vodenim topom pokazuje svoje najbolje rezultate. Primjenom višekriterijske analize moguće je dobiti optimalne opcije izbora pojedinog modela helikoptera i vodenih topova u funkciji najveće pouzdanosti gašenja i najmanjih operativnih troškova.

ZAKLJUČAK

Conclusion

Konverzije helikoptera u protupožarnu inačicu opremljenu vodenim topom predstavlja složeni višekriterijski problem. Optimiranjem zahtjevanih karakteristika i, sukladno statističkim procjenama vrsta i lokacija požara na visokim i teže dostupnim objektima, moguće je izabrati pouzdanu platformu sposobnu za pokrivanje širokog spektra taktika i načina gašenja požara iz zraka. Usvojene taktike gašenja požara helikopterom s vodenim topom pokazuju se pouzdanim u širokom rasponu slučajeva požara, a izazov prema daljnjem napretku predstavlja razvoj sofisticiranih ciljničkih uređaja kojima bi se učinkovitost i taktika gašenja još više poboljšale.

U analizi stabilnosti helikoptera opremljenog vodenim topom bitno je naglasiti da su sve amplitude u granicama linearne teorije koje je bila primijenjena u analizi s impulsnim i vodenim topom s kontinuiranim mlazom. U oba slučaja, nakon djelovanja impulsnog topa ili nakon početka djelovanja vodenog topa s kontinuiranim mlazom, helikopter je dobio slične perturbacije kutne brzine propinjanja, kuta propinjanja i komponente brzine uzduž osi x . Razlika ovih dvaju slučajeva je u vertikalnoj komponenti brzine - za djelovanje topa s kontinuiranim mlazom postoji mala početna vrijednost brzine u smjeru prema gore. Zaključak analize od interesa pilotu jest činjenica da su svi ovi poremećaji kvaziperiodični i divergentni s kvazi-periodom od oko 15 s, što će pilotu dati dovoljno vremena za poduzimanje reakcije kako bi svojim upravljanjem poništio učinke ovih poremećaja.

Sustavi vodenih topova za protupožarnu namjenu iz zraka još uvijek se ne koriste u vatrogasnim i postrojbama potpore vatrogastvu u RH. Visoki stupanj izgradnje moderne infrastrukture podrazumijeva, između ostaloga, i postojanje visokih zgrada i općenito teže dostupnih objekata na kojima bi pojava požara najbrže bila lokalizirana djelovanjem iz zraka. Doprinos u brzini reakcije i neutralizacije vatre s najmanjim troškovima, predstavlja osnovnu prednost helikoptera opremljenog vodenim topom bez alternative. Uzimajući u obzir spomenute činjenice, kao i trendove uvođenja u operativnu protupožarnu uporabu helikoptera s vodenim topovima u gradovima drugih zemalja Europske unije, vjerujem kako će ova tema naići na plodno tlo i realizaciju u RH s ciljem doprinosa ukupnoj učinkovitosti protupožarnog djelovanja.

ZAHVALA - Acknowledgements

Prilikom izrade ovog rada nesebičnu stručnu pomoć dobili smo od prof. dr. sc. Slobodana Jankovića na čemu mu se iskreno zahvaljujemo!

LITERATURA References

1. IFEX GmbH, 2011: *The Firecopter - impulse technology airborne*
2. Padfield G. D., 2007: *Helicopter Flight Dynamics, Second Edition*
3. Vuković, D., Slamić, M., Janković, S., Vrdoljak, M., 2010: *About the influence of the atmosphere over the wildfire on the flight dynamics for helicopter simulator application, Proceedings of 36th European Rotorcraft Forum*
4. Vuković, D., Vrdoljak, M., Janković, S., 2012.: *Analysis of the stability of the helicopter with water cannon, 7th International Congress of Croatian Society of Mechanics*
5. Zanenga, E., Leorello, D., Bottasso C. L., 2010: *Feasibility Study of Rotorcraft Fire Fighting for High-Rise Buildings, Journal of Aerospace Engineering, vol. 23, no. 3., pp. 166-175*