

ROMÂNIA
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați
Școala Doctorală de Științe Fundamentale și Inginerești



TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

**Contribuții la dezvoltarea unui sistem de
monitorizare a pierderilor pe liniile
electrice de înaltă tensiune prin
supravegherea cu avioane fără pilot**

Doctorand:
Cpt. ing. Cristian VIDAN

Conducător de doctorat:
Prof. univ. dr. habil. ing. Marian GĂICEANU

Seria I3: Inginerie Electrică
GALAȚI
2020

Mulțumiri

La finalul stagiului de doctorat, mă simt onorat să adresez cuvinte de mulțumire sinceră și sentimente de aleasă considerație domnului prof. univ. dr. habil. ing. Marian GĂICEANU, pentru sprijinul, încrederea, răbdarea și încurajarea, acordate în momentele dificile apărute pe parcursul elaborării tezei de doctorat. Sugestiile pe care le-am primit și dese discuții purtate au condus la îmbunătățirea permanentă a redactării tezei.

Mulțumesc domnului conf.univ.dr.ing. Pericle Gabriel MATEI, pentru susținere și sugestiile constructive acordate în elaborarea tezei și pe parcursul activității de cercetare. De asemenea, doresc să exprim mulțumirile mele domnului prof.univ.dr.ing. Adrian FILIPESCU și domnului conf.univ.dr.ing. Ion VONCILĂ pentru obsevațiile pertinente și sugestiile pline de însemnătate de care am avut parte în cadrul prezentării referatelor și care au dus la o îmbunătățire semnificativă a software-ului CDC (Clasificare a Descărcării Corona) proiectat în cadrul acestei lucrări.

Adresez calde mulțumiri și apreciere sinceră domnului decan al Facultății de Aeronave și Autovehicule Militare, prof. univ. dr. ing. Mihai MIHĂILĂ-ANDRES pentru înțelegerea de care a dat dovadă, cât și întregului colectiv al Departamentului de Sisteme Integrate de Aviație și Mecanică din Academia Tehnică Militară "Ferdinand I" unde mi-am desfășurat ce mai mare parte din activitatea de cercetare. De asemenea, doresc să scot în evidență colaborarea excelentă și dezbaterile infinite pe subiecte tehnice avute cu colegii mei din Centrul de Excelență "Sisteme Autopropulsate și Tehnologii pentru Apărare și Securitate" din Academia Tehnică Militară „Ferdinand I”.

De asemenea, mulțumesc coordonatorului proiectului "Sistem avansat pentru reducerea pierderilor în transportul utilităților de interes strategic, bazat pe infrastructura IT și supraveghere aeriană autonomă (INSAV)", deoarece a avut o influență decisivă în alegerea titlului tezei.

Cu această ocazie doresc să aduc calde mulțumiri domnului prof. univ. dr. habil. ing. Lucian Teodor GRIGORIE pentru susținerea, îndrumarea și colaborarea în cadrul diferitelor proiecte de cercetare care au reprezentat piatra de temelie în cariera mea didactică și de cercetare.

Mulțumesc colegilor mei, lt. ing. Răzvan Viorel MIHAI și ing. prog. Mihaela MĂRĂCINE pentru colaborarea excelentă în elaborarea unor lucrări științifice care, în final, au dat consistență activității mele de cercetare în domeniul ingineriei electrice, cât și în domeniul aerospațial.

Nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc familiei mele, în special soției mele, Anca Elena VIDAN, pentru răbdare, înțelegere și sprijinul moral acordat pe întreaga perioadă a pregătirii tezei de doctorat.

București, Iulie 2020, Cpt. ing. Cristian VIDAN

VIDAN Cristian - Contribuții la dezvoltarea unui sistem de monitorizare a pierderilor pe liniile electrice de înaltă tensiune prin supravegherea cu avioane fără pilot

Cuprins

	Pag.	Pag.
	rezumat	teză
Mulțumiri	1	1
Cuprins	3	9
Cuvinte cheie	4	8
Actualitatea temei	5	-
I. INTRODUCERE	7	13
I.1. Motivația tezei	9	23
I.2. Obiectivele tezei	10	24
II. DESCĂRCAREA CORONA ȘI REȚEAUA ELECTRICĂ A ROMÂNIEI	11	28
II.1. Descărcarea Corona.....	11	34
II.2. Calculul pierderilor Corona pe o linie de 400 kV	13	43
II.2.1. Rezultate numerice obținute.....	16	51
III. SISTEME DE AVIOANE FĂRĂ PILOT (UAS).....	17	53
III.1. Proiectarea sistemului UAV pentru zbor pe LEA.....	17	88
III.1.1. Analiză comparativă a două tronsoane ale LEA	18	89
III.1.2. Proiectarea rutei de zbor a sistemului UAV	19	93
III.1.3. Proiectarea sistemului de avioane fără pilot (UAS).....	20	96
III.2. Proiectarea și simularea numerică a sistemului de control al altitudinii UAV-ului pentru zbor pe LEA.....	21	106
III.2.1. Particularizarea modelului matematic al UAV-ului Sky Walker	21	108
III.2.2. Modelarea canalului longitudinal in Matlab/Simulink	23	110
III.2.3. Proiectarea automatului de viteză	24	115
III.2.4. Rezultate numerice obținute	26	118
IV. ANALIZA DATELOR DE ZBOR ALE SISTEMULUI UAV DE MONITORIZAREA A LEA.....	27	122
IV.1. Analiza datelor de zbor ale UAV-ului proiectat	27	131
IV.2. Rezultate experimentale obținute în urma analizei parametrilor de zbor	28	134
V. ANALIZA DATELOR VIDEO RECEPȚIONATE DE LA SENZORUL OPTIC DISPUS LA BORDUL UAV	31	139
V.1. Blocul de achiziție a datelor.....	31	141
V.2. Blocul de preprocesare.....	32	143
V.3. Blocul de calcul al distanței la țintă	33	148

V.3.1. Modelul matematic al senzorului optic (camera Corona).....	34...157
V.4. Blocul de calcul al coordonatelor țintei	35...161
V.5. Blocul de urmărire a țintei	36...162
V.5.1. Calculul corecțiilor unghiurilor gimbalului	36...163
V.6. Blocul de clasificare.....	38...166
V.6.1. Descrierea algoritmilor de învățare automată supuși analizei.....	38...170
V.6.1.1. Algoritm de clasificare SVM (Support Vector Machine).....	38...170
V.6.1.2. Algoritm de clasificare liniar	38...172
V.6.1.3. Algoritm de clasificare cu kernel liniar.....	39...173
V.6.1.4. Algoritm de clasificare cu kernel polinomial.....	39...174
V.6.1.5. Kernel cu funcție cu baza radială (RBF – Radial Base Function)	40...174
V.6.1.6. Algoritm de clasificare cu kernel cu regresie logistică.....	40...174
V.6.1.7. Algoritm de clasificare kNN (k – Nearest Neighbor).....	40...175
V.6.1.8. Algoritm de clasificare RadiusNN (Radius Nearest Neighbor).....	41...175
V.7. Blocul de stocare și afișare a rezultatelor.....	41...177
VI. REZULTATE EXPERIMENTALE FINALE	41...179
VI.1. Moduri de validare a rezultatelor.....	41...179
VI.2. Descrierea seturilor de date folosite	43...182
VI.3. Rezultate experimentale obținute	44...183
VI.3.1. Experimentul I – Demonstrarea utilității modului de preprocesare.....	44...184
VI.3.2. Experimentul II – Testarea empirică a algoritmilor posibili	45...188
VI.3.3. Experimentul III – Optimizarea algoritmilor aleși	47...192
VI.3.4. Experimentul IV - Validarea algoritmilor aleși cu un flux de cadre video nou introdus	48...197
VII. CONCLUZII FINALE	51...201
VIII. CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE	53...207
Bibliografie selectivă	55...210
Lista lucrărilor științifice.....	56.....2
Proiecte de cercetare	57.....3

Cuvinte cheie

Linii Electrice Aeriene, Monitorizare, Sisteme de Avioane fără Pilot, Controlul zborului, Camera Corona, Procesare de Imagine, Învățare automată, Algoritmi de Inteligență Artificială.

Actualitatea temei

O caracteristică importantă a epocii contemporane o reprezintă dezvoltarea disciplinelor științifico-ingineresti, caracteristică esențială a societății cunoașterii prin care se încearcă să se răspundă creșterii complexității realităților economico-sociale care impune abordări interactive și inovative.

Atât pe plan mondial cât și în țara noastră au apărut, în ultima perioadă, îngrijorări cu privire la principalele efecte negative asociate descărcării Corona precum: pierderile de putere activă în rețelele de înaltă și foarte înaltă tensiune, îmbătrânirea izolației lichide sau solide și perturbații în rețelele de telecomunicații.

Am ales această temă deoarece am plecat de la premisa că economia de piață, în situații de risc și criză, nu poate funcționa fără energie electrică sustenabilă, iar stabilitatea unei țări depinde, în mare măsură, de acest lucru. Cunoașterea pierderilor produse prin descărcarea Corona, de asemenea, este foarte importantă în privința economiei de piață deoarece influențează în mod direct principalele costuri ale companiilor transportatoare de energie electrică.

În ceea ce privește gradul de studiere a temei de cercetare se poate afirma faptul că aceasta a fost abordată intens în ultimii ani atât în cadrul diferitelor teze de doctorat, a unor articole științifice sau a unor proiecte de cercetare. În unul dintre ceaste proiecte de cercetare și anume: *Platforme UAV (vehicule aeriene fără pilot uman) cu capacități dedicate și infrastructură suport, pentru aplicații în misiuni de securitate națională (UAVino)* din Programul Operațional Sectorial Creșterea Competitivității Economice, Axa prioritară 2 – Competitivitate prin CDI, PN-III-P2-2.1-SOL-2016-01- 0008, am participat ca membru în echipa de cercetare.

Tematica tezei de doctorat este importantă și prin faptul că a introdus sistemele de avioane fără pilot cu aripă fixă în procesul de verificare și monitorizare al liniilor electrice. Până acum mentenanța pe liniile de înaltă tensiune se realiza cu elicopterul având pilot uman la bord, cu UAV-ul cu aripă rotativă, deoarece dispunea de caracteristica de zbor la punct fix și cu vehicule terestre (mașini de teren) având diferiți senzori de detectare a defectelor apărute pe liniile electrice.

De asemenea, unul dintre cele mai actuale domenii de cercetare și anume inteligența artificială și domeniul *machine learning* au fost abordate în vederea procesării în timp real a fluxului de date video recepționat de la senzorul optic dispus la bordul UAV-ului.

Pentru o abordare structurată, o vedere de ansamblu și un plan bine definit, teza de doctorat a fost împărțită, în 3 etape care au reprezentat cele 3 rapoarte intermediare de cercetare. La rândul lor, aceste rapoarte eu fost împărțite în 15 obiective specifice abordate pe parcursul celor 8 capitole ale tezei de doctorat, prezentate în cadrul acestui rezumat la subcapitolul *I.2. Obiectivele tezei*, iar pentru îndeplinirea acestora, pe parcursul cercetării, întotdeauna s-a avut în vedere obiectivul principal al acestei lucrări.

Obiectivul principal al tezei de doctorat este reprezentat de dezvoltarea unui sistem de monitorizare a pierderilor pe liniile electrice de înaltă tensiune prin survolarea, supravegherea și detectarea descărcării Corona cu ajutorul sistemelor de avioane fără pilot.

În concluzie, tema de doctorat este de mare actualitate, prezintă un interes continuu din partea companiilor transportatoare de energie electrică, iar din punct de vedere științific are un potențial imens fiind având conexiune cu domenii precum procesarea de imagine, sisteme de avioane fără pilot și inteligență artificială.

VIDAN Cristian - Contribuții la dezvoltarea unui sistem de monitorizare a pierderilor pe liniile electrice de înaltă tensiune prin supravegherea cu avioane fără pilot

I. INTRODUCERE

Strategia energetică are implicații importante asupra securității naționale, deoarece o țară fără resurse energetice proprii este vulnerabilă în fața unui conflict armat, iar dependența de altă putere energetică o obligă pe aceasta să încheie tranzacții dezavantajoase pentru a menține siguranța cetățenilor. Astfel că, pentru un echilibru la nivel național, securitatea energetică este asigurată prin: menținerea unei balanțe echilibrate între cerere și producția națională de energie, optimizarea resurselor energetice primare conform structurii consumului și creșterea eficienței în domeniul energetic. Atât diversificarea surselor și a rutelor de aprovizionare, cât și limitarea dependenței de resurse energetice din import, pe viitor, reprezintă o prioritate asupra căreia România dorește să acționeze[1]. Acest lucru poate fi realizat prin reducerea pierderilor, mai ales, pe rețelele de înaltă tensiune. O mare parte a pierderilor de pe liniile electrice aeriene este cauzată de descărcarea Corona, iar pentru anihilarea acestui fenomen sunt necesare două etape: detectarea acestuia și înlocuirea componentelor uzate, specifice LEA, care duc la apariția acestui fenomen și implicit la pierderi semnificative și care, în final, creează multe dezavantaje atât la nivel economic, cât și mediului înconjurător.

În ultimii ani, utilizarea sistemelor de avioane fără pilot a crescut foarte mult, atât în aplicații individuale cât și în aplicații industriale, mai ales în monitorizarea liniilor electrice de transport [6]-[8].

Monitorizarea rețelelor de înaltă tensiune utilizând echipament de zbor fără pilot (UAV, dronă) reprezintă un avantaj major față de metodele clasice utilizate. Avantajele utilizării unui astfel de sistem de avioane fără pilot pentru monitorizarea liniilor de înaltă tensiune sunt:

- ❖ Manevrabilitatea ridicată;
- ❖ Capacitatea de a urma un plan de zbor prestabilit;
- ❖ Dimensiuni reduse ale aparatului de zbor;
- ❖ Rezoluția ridicată a senzorului optic;
- ❖ Costurile de zbor reduse;
- ❖ Operatorul uman se afla în afara zonei de risc;
- ❖ Arie mare de acoperire;

Pentru inspecțiile statice, care nu necesită o survolare îndelungată sunt folosite sisteme de avioane fără pilot cu aripă rotativă (quadcopter, hexacopter, octacopter etc.),[20],[21], cât și roboți cățărați specializați, cuplați la conductorul liniilor de înaltă tensiune, care sunt capabili să parcurgă întreaga lungime a conductorului și să identifice eventualele deteriorări sau pierderi [22]. Astfel, acești roboți trebuie să se mențină ancorați de conductor, să traverseze obstacole de-a lungul liniei electrice necesitând astfel mecanisme robotizate complexe.

Tot în domeniul roboților specializați în inspecții pe LEA, a fost dezvoltat un robot hibrid [24], capabil să aterizeze pe conductorii liniilor de înaltă tensiune, apoi să se comporte ca un robot cățărațor. În momentul când acesta întâlnește un obstacol de-a lungul conductorului, cum ar fi un izolator electric, este capabil să se desprindă de conductor, trecând în modul de zbor, urmând ca apoi să aterizeze din nou pe aceeași linie de înaltă tensiune, astfel depășind obstacolul întâlnit.

De asemenea, dezvoltarea de noi tehnologii a permis aeronavelor cu aripă fixă să poată ateriza pe liniile de înaltă tensiune folosindu-se de câmpul electromagnetic generat de LEA și de o unitate inerțială de măsură (IMU) pentru determinarea atitudinii UAV-ului în zbor. În

lucrarea [26], este proiectat un sistem experimental de detecție a câmpului electromagnetic generat de liniile electrice de înaltă tensiune, de la o distanță de 4 metri. Astfel, cu ajutorul blocului de estimare al stărilor și cu o filtrare Kalman foarte precisă s-a reușit aterizarea pe liniile de înaltă tensiune cât și încărcarea acumulatorilor prin inducție electromagnetică [27],[28], într-un timp scurt, ducând astfel la reluarea zborului și continuarea procesului de inspecție.

Diferența dintre roboții zburători, incluzând UAV-uri cu aripă fixă sau UAV-uri multi-rotor, și roboții cățărători sau hibrizi, este aceea că cei zburători sunt suficient de flexibili pentru a depăși diverse obstacole și posedă o perspectivă a senzorilor mult mai bună. De asemenea, un UAV cu aripă fixă are avantajul distanței lungi de zbor, dar totuși este prea rapid pentru a obține informații de detaliu asupra liniilor de înaltă tensiune față de un UAV cu aripă rotativă [29], [30]. Deși un UAV cu aripă rotativă, este mai manevrabil și are posibilitatea să rămână la punct fix, timpul scurt de zbor îi limitează capacitatea de inspecție pe distanțe lungi.

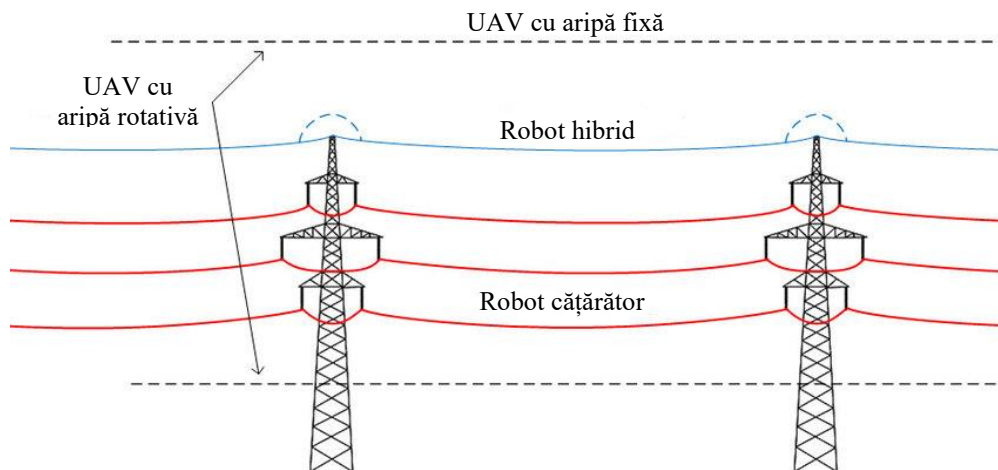


Fig.1.4. Inspecția liniilor de înaltă tensiune cu diferite sisteme autonome [24]

În fig.1.4. este prezentată o vedere de ansamblu a diferitelor tipuri de sisteme autonome capabile să facă inspecții detaliate pe liniile de înaltă tensiune.

În cazul descărcării Corona, care este un fenomen a cărui apariție nu este atât de frecventă și invizibilă pentru ochiul uman, folosirea UAV-urilor cu aripă fixă poate fi cea mai bună soluție. Echiparea acestor UAV-uri cu camera Corona [32] sau chiar camera IR [33], în cazul în care deteriorarea rețelei electrice este într-o fază avansată, este unul dintre subiectele studiate în cadrul tezei care a dus la rezultate interesante.

Tehnologia de detectarea a descărcărilor Corona cu ajutorul imaginilor în spectrul UV, stă la baza mentenanței pe liniile aeriene de înaltă tensiune [34]-[36]. Cu ajutorul tehnologiei UV, se pot capta fotoni cu lungimea de undă specifică semnalului UV, iar apoi aceștia sunt suprapuși cu radiația în spectrul vizibil pentru a determina locația apariției descărcării Corona, iar intensitatea Corona este determinată pe baza numărului de fotoni captați.

În referințele [43] și [44], s-a studiat rata de descărcare Corona la diverse tensiuni aplicate, iar pe baza analizei imaginilor în spectrul UV s-a determinat această rata de descărcare. De asemenea, în referința [45], au fost studiați mai mulți factori care influențează

acuratețea detectării Corona din imaginile UV, printre care, numărului de fotoni captați, detectarea distanței de la cameră la locul unde are loc descărcarea, capacitatea de descărcare.

În această lucrare este concepută, proiectată și prezentată o metodă de detectarea a descărcării Corona care se bazează pe procesarea și analiza fluxului video de date recepționat de la o cameră Corona dispusă la bordul unui UAV cu aripă fixă. De asemenea, pe parcursul acestei lucrări sunt prezentate avantajele, dar mai ales dezavantajele apariției descărcării Corona pe liniile electrice de înaltă tensiune, este realizat un scenariu de zbor autonom cu un sistem UAV cu aripă fixă care este capabil să survoleze linii electrice de înaltă tensiune în diferite zone de relief pe baza unui traseu de zbor creat special pentru LEA. De asemenea, survolarea liniilor de înaltă tensiune cu sisteme UAV cu aripă fixă, cât și dezvoltarea algoritmului de clasificare a descărcării Corona, parte a software-ului CDC (Corona Discharge Classification), reprezintă o parte din elementele de noutate ale acestei teze de doctorat.

1.1. Motivația tezei

Principala motivație pentru începerea studiilor de doctorat în acest domeniu o reprezintă nevoia transportatorilor de energie electrică pentru reducerea pierderilor pe liniile electrice de înaltă tensiune. Detectarea în faza incipientă a celui mai periculos factor ce duce la pierderi de putere, și anume, descărcarea Corona, este încă o provocare pentru multe echipe de cercetători și de un interes imens din partea firmelor care asigură mentenanța pe liniile electrice aeriene. De asemenea, un alt factor care a dus la începerea acestui studiu a fost introducerea sistemelor de avioane fără pilot cu aripă fixă în procesul de verificare și monitorizare al liniilor electrice. Până acum mentenanța pe liniile de înaltă tensiune se realiza cu elicopterul având pilot uman la bord, cu UAV-ul cu aripă rotativă, deoarece dispunea de caracteristica de zbor la punct fix și cu vehicule terestre (mașini de teren) având diferiți senzori de detectare a defectelor apărute pe liniile electrice.

O altă motivație pentru începerea studiilor doctorale și abordarea acestei teme este dată de faptul că domeniul UAV este în continuă expansiune atât din punct de vedere al misiunilor ce pot fi îndeplinite de vectorii aerieni, cât și din punct de vedere al soluțiilor constructive. Succesele înregistrate de sistemele UAV în operațiunile militare au influențat creșterea interesului în rândul forțelor armate, cât și al companiilor civile pentru utilizarea acestora. Dezvoltarea nanotehnologiilor, opto-electronicii, cât și perspectiva utilizării materialelor inteligente poate face posibilă realizarea de proiecte UAV din ce în ce mai complete, capabile să execute misiuni atât în domeniul civil cât și militar.

De asemenea, inteligența artificială și domeniul *machine learning* sunt încă la început și pot oferi rezultate neașteptate pe parcursul cercetării. În această lucrare, mi-am propus realizarea unui bloc de clasificare a descărcării Corona pe baza algoritmilor de inteligență artificială, ceea ce reprezintă o motivație în plus pentru finalizarea cu succes a tezei de doctorat.

1.2. Obiectivele tezei

Pentru o abordare structurată, o vedere de ansamblu și un plan bine definit, teza de doctorat a fost împărțită, în 3 etape care au reprezentat cele 3 rapoarte intermediare de cercetare. La rândul lor, aceste rapoarte au fost împărțite în obiective specifice care pentru

îndeplinirea acestora, pe parcursul cercetării, întotdeauna s-a avut în vedere obiectivul principal al acestei lucrări.

Obiectivul principal al tezei de doctorat este reprezentat de dezvoltarea unui sistem de monitorizare a pierderilor pe liniile electrice de înaltă tensiune prin survolarea, supravegherea și detectarea descărcării Corona cu ajutorul sistemelor de avioane fără pilot.

Pentru realizarea obiectivului principal al tezei mi-am propus să îndeplinesc următoarele obiective specifice, astfel:

OS1: Documentare cu privire la stadiul actual al utilizării sistemelor de avioane fără pilot (UAS) pe liniile electrice de înaltă tensiune în vederea detectării descărcării Corona.

OS2: Studiu asupra liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune din România și din alte țări, modul de transport al energiei electrice și documentare cu privire la executarea procedurilor de mentenanță specifice LEA.

OS3: Studiu asupra pierderilor de tensiune pe liniile electrice aeriene cauzate de descărcarea Corona, metode de detectarea și clasificarea descărcării Corona.

OS4: Calculul pierderilor cauzate de descărcarea Corona prin elaborarea unui model de simulare numerică a unei linii de înaltă tensiune de 400 kV.

OS5: Analiză asupra sistemelor de avioane fără pilot (UAS) existente, capabile să îndeplinească misiuni de detectare a pierderilor pe LEA.

OS6: Studiu asupra senzorilor folosiți la bordul sistemelor de avioane fără pilot, a canalelor de comunicații, a tipurilor de datelor folosite în domeniul UAS și a metodelor de control al zborului.

OS7: Proiectarea soluției tehnice a platformei de zbor și a senzorilor dispuși la bordul acesteia.

OS8: Proiectarea soluției tehnice a sarcinii utile de la bordul UAV-ului și integrarea cu echipamentele de avionică.

OS9: Proiectarea sistemului de control al altitudinii UAV-ului și analiza rezultatelor obținute prin simulare numerică.

OS10: Analiza parametrilor de zbor ai sistemului UAV pentru un scenariu de zbor prestabilit în vederea urmăririi liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune.

OS11: Proiectarea sistemului de interpretare a datelor video recepționate de la senzorul Corona dispus la bordul UAV-ului.

OS12: Demonstrarea matematică a funcționalității blocurilor componente ale software-ului CDC (Corona Discharge Classification).

OS13: Proiectarea și realizarea software a blocului de clasificare a descărcării Corona folosind algoritmi de antrenare a datelor.

OS14: Alegerea algoritmului de clasificare cu performanțele cele mai bune, în urma verificării scorului, acurateții și a timpilor de antrenare / testare pentru un set de date care nu a mai fost procesat.

OS15: Analiza și interpretarea rezultatelor obținute, moduri de utilizare a rezultatelor și propuneri de dezvoltare ulterioară.

Obiectivele specifice prezentate mai sus, sunt abordate pe parcursul celor 8 capitole ale tezei de doctorat, fiind prezentate comentarii, analize și modul de îndeplinirea a obiectivelor, la finalul fiecărui capitol în parte.

II. DESCĂRCAREA CORONA ȘI REȚEAUA ELECTRICĂ A ROMÂNIEI

În România, rețelele electrice de distribuție și transport sunt caracterizate printr-un grad avansat de uzură fizică (circa 65%) a liniilor electrice de joasă, medie și înaltă tensiune, a stațiilor de transformare și a posturilor de transformare. La aceasta se adaugă uzura morală, 30% din instalații fiind echipate cu aparataj produs în anii '60. Consumul propriu tehnologic în rețelele de distribuție (inclusiv pierderile comerciale) ca valoare medie anuală este superioară mediei țărilor din UE cu 7,3% [1].

Rețeaua electrică de transport (RET) a României este prezentată în fig. 2.1. și este formată din mai multe tronsoane de linii aeriene pe care circulă energie electrică la diferite tensiuni.

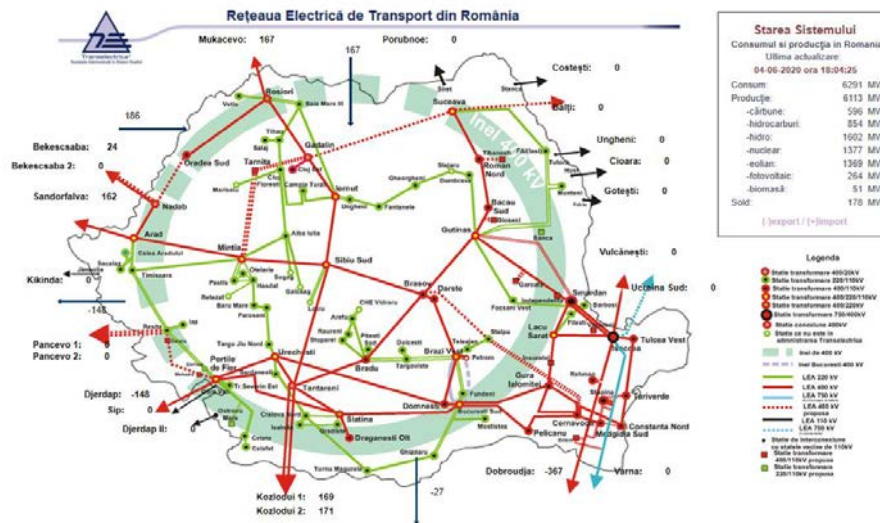


Fig. 2.1. Dispunerea liniilor electrice de înaltă și foarte înaltă tensiune pe teritoriul României [1]

Se observă că 97% din lungimea liniei de transport a energiei electrice a României este alcătuită din linii electrice aeriene de 220 kV și 400 kV cu o lungime totală de 8.731,63 km. Prin urmare, atenția asupra pierderilor de putere activă cauzate de descărcarea Corona va fi îndreptată asupra acestor tensiuni.

II.1. Descărcarea Corona

Liniile electrice aeriene de înaltă tensiune (cu tensiunea nominală mai mare sau egală cu 110kV) transportă energie electrică de la sursele de producere a energiei electrice (centrale electrice) către stațiile de transformare din apropierea orașelor. La aceste tensiuni foarte mari, se formează un fenomen numit descărcarea Corona.

Descărcarea Corona reprezintă un proces autonom care apare în jurul unui electrod cu rază de curbură mică, în cazul aplicării unei tensiuni egale sau mai mari decât o valoare minimă dependentă de caracteristicile geometrice ale electrodului și ale mediului în care se produce aceasta [70].

Prezența descărcării Corona reduce, substanțial, fiabilitatea rețelei de transport a energiei electrice, ducând la o degradare a izolației acesteia. Chiar dacă, descărcarea Corona

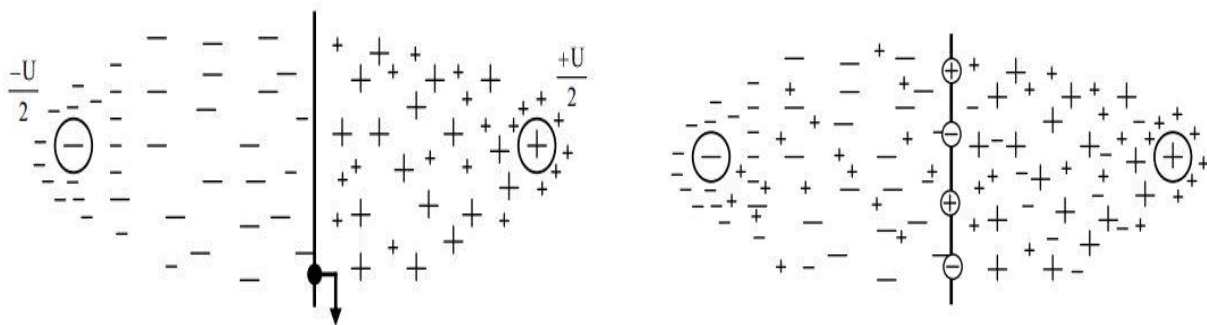
este un proces energetic care apare rar, pe perioade lungi de timp, aceasta poate degrada sever materialele dielectrice din componența izolației. Astfel că, efectele acestui fenomen se cumulează sau pot deveni permanente, iar străpungerea izolatoarelor poate apărea fără avertisment.

Într-un stadiu avansat, descărcarea Corona este însoțită de fenomene luminoase (coroană luminoasă violetă în jurul conductoarelor), acustice (zgomot specific caracterizat printr-un bâzâit continuu sau pocnete), chimice (aparitia ozonului și producerea acidului azotic care poate ataca armăturile izolatoarelor). De asemenea, în urma expunerii componentelor rețelei electrice la descărcarea Corona, pot apărea eroziuni mecanice ale suprafețelor cauzate de bombardamentul cu ioni, încălzirea izolatoarelor și depozitarea de carbon care duce la producerea arcurilor electrice[76].

O primă clasificare a descărcării Corona se poate face în funcție de forma tensiunii aplicate și anume:

- descărcarea Corona de tensiune continuă;
- descărcarea Corona de tensiune alternativă;
- descărcarea Corona de impuls.

O a doua clasificare se poate face din punct de vedere fenomenologic. Astfel descărcarea Corona poate fi unipolară sau bipolară.



a. Descărcarea Corona unipolară

b. Descărcarea Corona bipolară

Fig. 2.5. Tipuri de descărcare Corona [70]

În funcție de polaritatea tensiunii electrice aplicate pe electrodul cu rază de curbură mica, există două tipuri de descărcare Corona: negativă (când electrodul este energizat negativ - catod) și pozitivă (când electrodul este energizat pozitiv - anod). Aceste două tipuri de descărcare Corona au caracteristici comune, dar au și particularități specifice.

II.2. Calculul pierderilor Corona pe o linie de 400 kV

Cunoașterea pierderilor produse prin descărcarea Corona este foarte importantă în privința economiei de piață deoarece influențează în mod direct principalele costuri ale companiilor transportatoare de energie electrică.

În continuare, mărimile de bază, caracteristice apariției descărcării Corona, sunt: intensitatea inițială (E_i), intensitatea critică (E_0) a câmpului electric, tensiunea inițială (U_i) și tensiunea critică de apariție a descărcării Corona (U_0) [97].

Având în vedere obiectul lucrării care se referă la liniile de înaltă tensiune de 220 kV și 400 kV, în continuare se va pune accent pe structura formată din două conductoare paralele care au o distanță mare între ele (450 – 550 cm). Astfel că, pentru distanțe între conductori mai mari de 5 m s-a constatat o scădere a intensității câmpului electric de descărcare Corona cu aproximativ 2% [70]. Explicația constă în faptul că la distanțe mari între conductoare descărcarea Corona nu mai este bipolară, ci unipolară.

Astfel că, în urma ultimelor rezultate experimentale efectuate pe o structură conductor-sol, cu distanță mare între conductor, intensitatea inițială (E_i) a câmpului electric de descărcare Corona este următoarea [70]:

$$E_i = 30,3\delta(1 + 0,298 / \sqrt{r_0\delta})[kV / cm] \quad (2.5.1)$$

Unde: δ - densitatea aerului

r_0 - raza conductorului

În timp ce, pentru conductoare având $r_0 \geq 1$ cm, se recomandă următoarea relație de calcul a intensității inițiale a câmpului electric de descărcare Corona [70]:

$$E_i = 24\delta(1 + 0,62 / \delta^{0,3} r_0^{0,38})[kV / cm] \quad (2.5.2)$$

Intensitatea câmpului electric de descărcare Corona este dependentă de densitatea aerului. Pentru temperatura standard, $t=20^{\circ}\text{C}$ și presiune atmosferică standard (760 mmHg) valoarea câmpului electric are valoarea de aproximativ 30 kV/cm, iar pentru orice altă temperatură și orice altă presiune atmosferică intensitatea câmpului electric de descărcare Corona se înmulțește cu factorul de corecție al densității aerului, δ , care se determină cu următoarea formulă:

$$\delta = \frac{p}{273+t} \cdot \frac{273+20}{760} = 0,386 \frac{p}{273+t} \quad (2.5.3)$$

Pierderea de putere activă pe rețea, este o funcție a factorului de corecție a densității aerului și cu cât valoarea acestuia este mai mare, cu atât sunt mai mici pierderile. La presiune atmosferică mică și temperaturi ridicate, valoarea tensiunii critice perturbatoare este mică iar descărcarea Corona și implicit pierderile sunt dominante.

Afel că, intensității inițiale a câmpului electric îi corespunde tensiunea inițială de descărcare Corona pentru un conductor situat la înălțimea h de sol și care se determină cu următoarea ecuație [70]:

$$U_i = m_1 m_2 E_i r_0 \ln \frac{2h}{r_0} \quad (2.5.4)$$

Unde: m_1 - coeficient ce ține seama de starea conductorului ($m_1 = 0.8 - 0.87$)

m_2 - coeficient ce ține seama de condițiile meteorologice ($m_2 = 0.8 - 1$)

Pentru conductoarele torsadate care se folosesc pe liniile de înaltă tensiune de 400 kV, $m_1 = 0.8$ prezintă o stare de deteriorare avansată a conductorului, iar $m_1 = 0.87$ rezultă că suprafața conductorului nu prezintă semne de deteriorare avansată [96].

Coeficientul care ține seama de condițiile meteorologice, este interpretat astfel: $m_2 = 0.8$ - reprezintă condiții meteo nefavorabile (chiciură, ploaie), iar pentru $m_2 = 1$ - condițiile meteo sunt cele standard ($t=20^{\circ}\text{C}$, $p=760\text{mmHG}$) [96].

Primul care a propus o formulă de calcul a pierderilor Corona a fost inginerul american F.W. Peek. Este necesar să se menționeze că, metodele de investigare experimentală erau la acea perioadă simple, însă relațiile determinate de Peek sunt valabile și astăzi.

Ecuatiile lui Peek sunt valabile pentru pierderi Corona care au ajuns în stadiul în care fenomenul poate fi observat vizual, adică un stadiu, relativ, avansat.

Astfel că, ecuația de calcul a pierderilor Corona dată de Peek este următoarea [96]:

$$P_c = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{d}} (U_f - U_i)^2 \cdot 10^{-5} [kV / km / faza] \quad (2.5.5)$$

Unde: P_c - pierderile Corona în kV/km/fază

f - frecvența curentului alternativ

U_f - tensiunea pe fază

U_i - tensiunea inițială de descărcare Corona

δ - densitatea aerului

r_0 - raza conductorului

d - distanța dintre conductori

În prezent, există tehnici moderne de construcție a liniilor de transport de înaltă și foarte înaltă tensiune care au o pierdere prin descărcarea Corona pentru condiții meteorologice ideale ($m_2 = 1$) de 0,1 până la 0,2 kW/km/fază [96]. În acest interval foarte scăzut de pierderi Corona, relațiile lui Peek pot ajunge la rezultate inexacte. Prin urmare, pentru a evita aceste inexactități, atunci când raportul dintre tensiunea pe fază și tensiunea inițială, $\left(\frac{U_f}{U_i}\right) \leq 2$, se folosește, pentru determinarea pierderilor cauzate de descărcarea Corona, formula lui Peterson [98]-[100]:

$$P_c = 2.1fF \left(\frac{U_i}{\log_{10}(d/r)} \right) \cdot 10^{-5} [kW / km / faza] \quad (2.5.6)$$

Unde F , este cunoscută ca fiind funcția pierderilor Corona sau factorul experimental Corona, acesta putând fi determinat în funcție de raportul U_f/U_i și este reprezentat în tabelul 3.

Tabelul 3: Valorile factorului experimental Corona în funcție de raportul U_f/U_i

U_f/U_i	F	U_f/U_i	F	U_f/U_i	F	U_f/U_i	F
1.00	0.037	1.26	0.120	1.52	1.10	1.78	4.72
1.02	0.039	1.28	0.136	1.54	1.33	1.80	4.95
1.04	0.042	1.30	0.154	1.56	1.59	1.82	5.17
1.06	0.045	1.32	0.176	1.58	1.88	1.84	5.39
1.08	0.048	1.34	0.200	1.60	2.20	1.86	5.60
1.10	0.052	1.36	0.228	1.62	2.52	1.88	5.81
1.12	0.057	1.38	0.260	1.64	2.83	1.90	6.01
1.14	0.063	1.40	0.300	1.66	3.13	1.92	6.21
1.16	0.069	1.42	0.38	1.68	3.42	1.94	6.41
1.18	0.075	1.44	0.48	1.70	3.70	1.96	6.61
1.20	0.082	1.46	0.60	1.72	3.97	1.98	6.81
1.22	0.092	1.48	0.74	1.74	4.23	2.00	7.00
1.24	0.105	1.50	0.90	1.76	4.48		

Pentru calculul pierderilor Corona a fost realizată o simulare cu ajutorul programului Matlab – Simulink, la baza căreia stau formulele analitice de calcul a pierderilor Corona, și anume, formula lui Peek și formula lui Peterson. Astfel că, în fig. 2.9. este prezentată schema de calcul estimativ a pierderilor Corona, pe baza parametrilor caracteristici ai linie electrice și a parametrilor atmosferici ai mediului în care se petrece descărcarea Corona și care sunt prezentați în tabelul următor:

Tabelul 4: Parametrii caracteristici ai unei linii de 400 kV și parametrii atmosferici în care apare descărcarea Corona

Denumire parametru	Simbol parametru	Valoare prestată
Tensiunea pe linie	U_l	400 kV
Distanța între conductori	d	550 cm
Rază conductor	r_0	1.2 cm
Înălțimea față de sol	h	15 m
Frecvența	f	50 Hz
Coeficientul ce ține seama de starea conductorului	m_1	0.87
Coeficientul ce ține seama de condițiile meteorologice	m_2	1
Presiunea atmosferică	p	760 mmHg
Temperatura	t	20°C

Modelul de calcul al pierderilor Corona, prezentat în fig. 2.9., este capabil să selecteze automat și autonom între metoda analitică de calcul a pierderilor Corona reprezentată de formula lui Peek și metoda analitică de calcul reprezentată de formula lui Peterson. Astfel că, această selecție a metodei analitice de calcul se face în funcție de raportul U_f/U_l și implicit de factorul experimental Corona, F , putând fi realizată cu ajutorul blocului If din Simulink, după ce în prealabil sunt calculate: tensiunea pe fază (U_f) și tensiunea inițială (U_i).

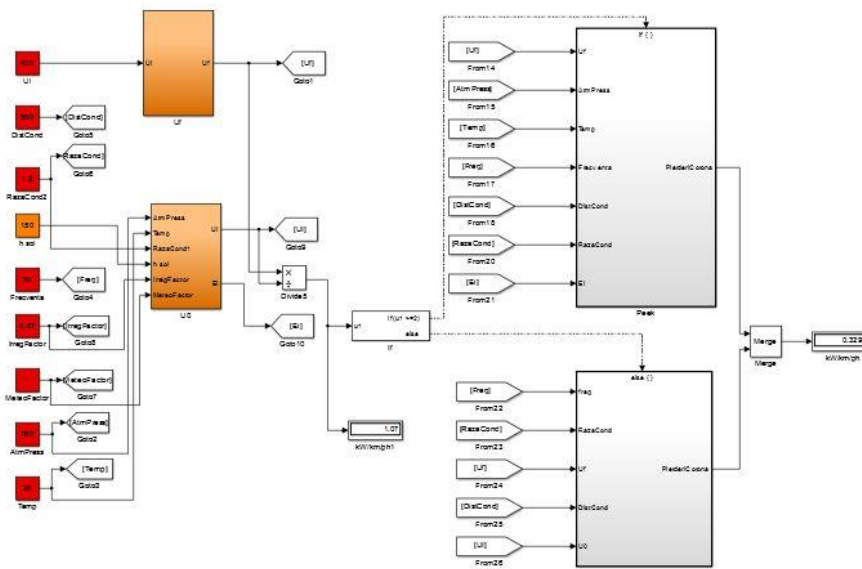


Fig. 2.9. Modelul de simulare a pierderilor cauzate de descărcarea Corona

Așadar, prin variația diferiților parametri, atât cei caracteristici ai liniei electrice de înaltă tensiune de 400 kV, cât și a factorilor de mediu, se pot exprima, grafic, pierderile cauzate de descărcarea Corona.

II.2.1. Rezultate numerice obținute

În figura 2.12 sunt prezentate graficele variației pierderilor Corona în funcție de factorul meteo (2.12.a), raza conductorului (2.12.b), și respectiv înălțimea față de sol (2.12.c). Trebuie specificat că pe axa Oy sunt reprezentate pierderile Corona în kW/km/fază, iar pe axa Ox sunt reprezentate valorile parametrilor analizați.

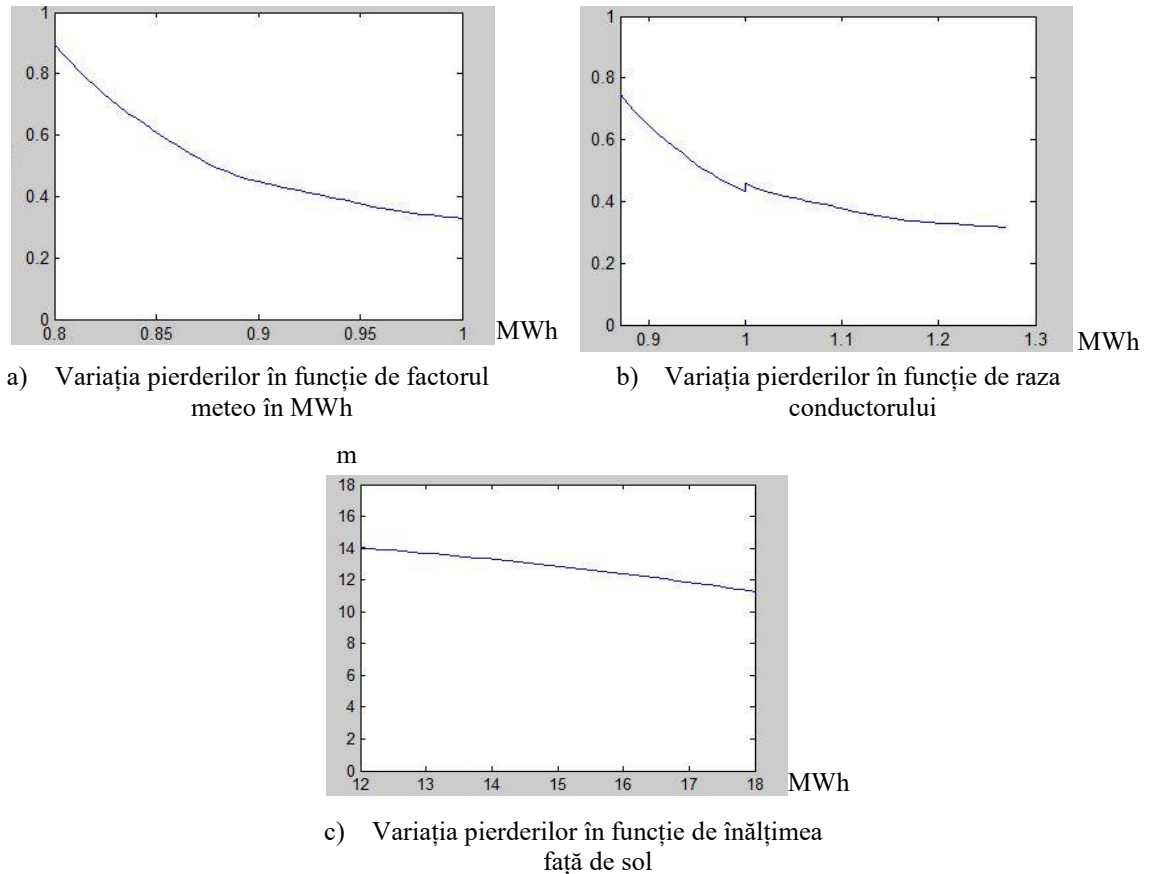


Fig. 2.12 Variații ale pierderilor provocate de descărcarea Corona în funcție de diverși parametri

Astfel că, se poate observa în graficul (2.12.a), că atunci când condițiile meteo sunt favorabile, pierderile cauzate de descărcarea Corona scad ușor. Același lucru se întâmplă și cu raza conductorului folosit pentru transportul energiei electrice, cu cât aceasta este mai mică cu atât scad pierderile de energie. De asemenea, se poate observa în graficul (2.12.c), că pierderile de putere activă cauzate de descărcarea Corona scad și mai mult, în funcție de înălțimea conductorului față de sol.

În urma calculelor efectuate cu modelul de simulare numerică a pierderilor Corona realizată în software-ul de simulare Matlab-Simulink, rezultatele sunt foarte bune, comparabile cu cele realizate experimental pe diferite tronsoane ale liniilor electrice aeriene din România.

III. SISTEME DE AVIOANE FĂRĂ PILOT (UAS)

Aeronava fără pilot (*Unmanned Aerial Vehicle - UAV*) este un aparat de zbor căruia îi lipsește pilotul uman, fiind ghidat fie de către un autopilot computerizat aflat la bordul său sau în altă aeronavă pilotată, fie prin legătură telecomandată cu o stație de comandă și control aflată la sol. O descriere mai simplă a acestui tip de sistem aerian este aceea că, un UAV reprezintă, de fapt, o aeronavă la care personalul navigant a fost îndepărtat și înlocuit cu un sistem informatic și o legătură radio.

Astfel că, terminologia UAS se refera la un întreg sistem de avioane fără pilot care poate fi compus din stații terestre de control, aeronava propriu-zisă, legătura de comunicații, echipamente de suport la sol și sisteme de lansare/recuperare, în timp ce termenul de UAV se referă strict la aparatul de zbor. Astfel că, se poate afirma că termenul UAV este parte integrată dintr-un UAS [102] așa cum este exemplificat și în figura 3.1.

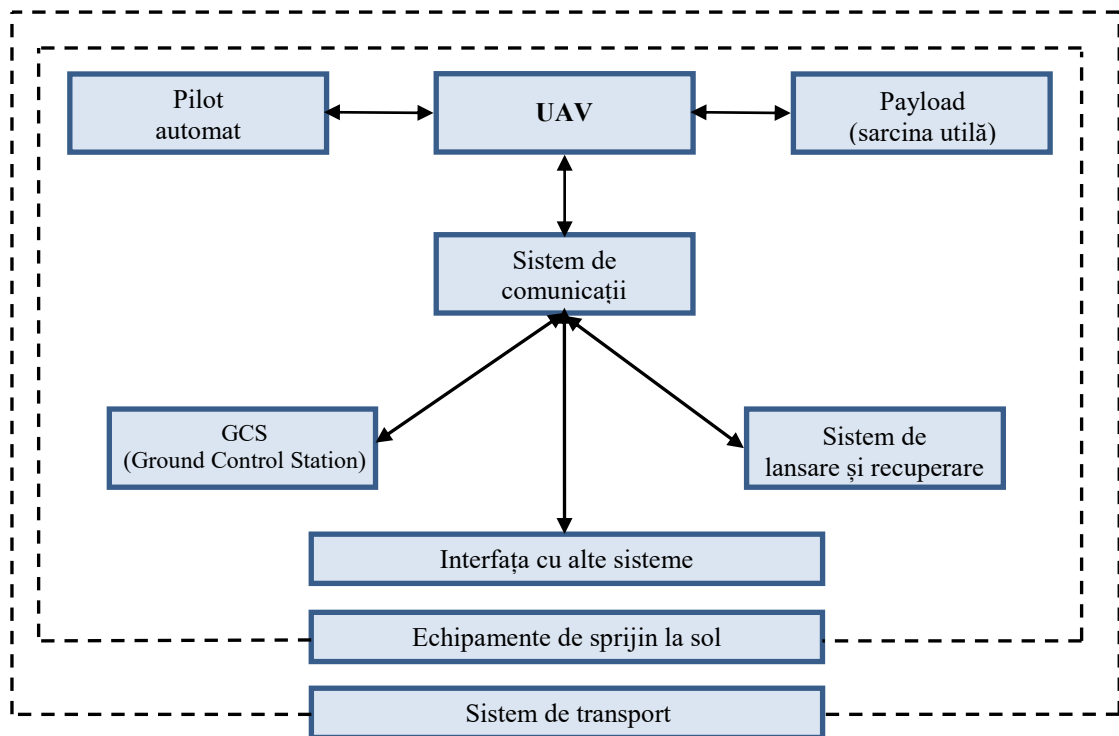


Fig. 3.1. Structura funcțională a unui UAS

În concluzie, fiecare subsistem din compunerea unui UAS este important, iar lipsa sau folosirea necorespunzătoare poate duce la accidente atât asupra personalului de mentenanță, cât și a sistemului propriu-zis.

III.1. Proiectarea sistemului UAV pentru zbor pe LEA

La proiectarea sistemului UAV ce va fi folosit pentru survolarea liniilor de înaltă tensiune s-au luat în calcul următoarele aspecte: relieful României și dispunerea tronsoanelor liniilor de înaltă tensiune, legătura de date dintre UAV și GCS, tipul de UAV folosit în funcție de misiunea specifică, performanțele de zbor ale acestuia, proiectarea unui traseu de zbor specific zborului pe LEA și prielic detectării descărcării Corona. De asemenea, clima și

mediul în care zboară UAV-ul, cât și nivelul interferențelor câmpului electromagnetic din jurul conductoarelor LEA reprezintă aspecte foarte importante în proiectarea unui sistem de avioane fără pilot dedicat detectării descărcării Corona.

Pentru monitorizarea, urmărirea și analiza liniilor electrice de înaltă tensiune cu ajutorul unui sistem de UAV-uri, este recomandată alegerea unui sistem de avioane fără pilot care să îndeplinească cât mai bine sarcinile și misiunile primite. În concluzie, varianta propusă, de această lucrare, pentru o monitorizare eficientă a rețelei naționale de înaltă tensiune este un UAV cu aripa fixă. S-a ajuns la această concluzie prin alegerea unui UAV care să nu necesite sistem de lansare și recuperare, astfel putând fi utilizat în orice zonă de relief.

III.1.1. Analiză comparativă a două tronsoane ale LEA

Înainte de proiectarea propriu-zisă a sistemului UAV, este necesară efectuarea unui studiu a rețelei electrice a României, a reliefului pe care este plasată aceasta, cât și condițiile climatice care apar în regiunile în care se presupune că va zbura UAV-ul.

Pentru a demonstra necesitatea detectării pierderilor de putere pe rețelele de înaltă tensiune cu ajutorul unui UAV se impune o analiză comparativă a două tronsoane din rețeaua electrică de înaltă tensiune (400 kV) care au fost stabilite în urma faptului că sunt dispuse în zone de relief diferite. Aceste tronsoane sunt:

1. Brașov – Bradu;
2. Smârdan – Lacu Sărat – Însurăței – Gura Ialomiței.

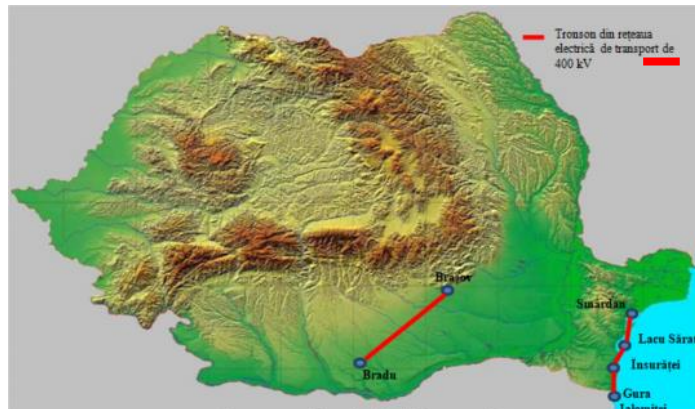


Fig. 3.8. Harta formelor de relief a României cu tronsoanele alese pentru studiu

Analiza acestor tronsoane este realizată din punct de vedere al lungimii acestora, așa cum apare în fig. 3.9, cât și din punct de vedere al altitudinii medii a reliefului zonelor pe unde acestea trec (fig. 3.10).



Fig. 3.9. Lungimea tronsoanelor liniilor de înaltă tensiune analizate

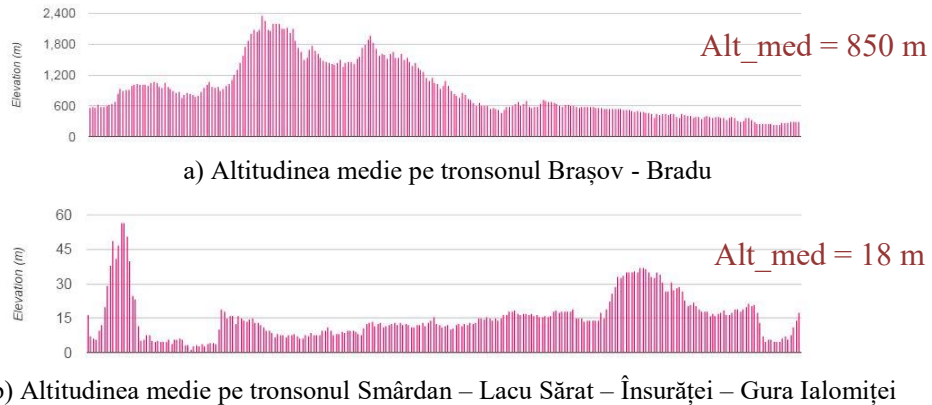


Fig. 3.10. Altitudinea medie a tronsoanelor LEA supuse studiului

În concluzie, înainte de proiectarea sistemului UAV ce va zbura pe liniile aeriene de înaltă tensiune a fost necesar să se realizeze unui studiu comparativ între diferite tronsoane ale LEA, în vederea stabilirii condițiilor de zbor, a legăturii de comunicații dintre UAV și GCS și a realizării unei analize critice a formelor de relief ale României, specifice pentru fiecare misiune de zbor în parte.

III.1.2. Proiectarea rutei de zbor a sistemului UAV

Planificarea misiunii și realizarea unei rute de zbor este necesară înaintea fiecărei decolări și asigură traseul ce trebuie urmărit de UAV, format din puncte de interes, numite în continuare waypoint-uri. Acestea sunt caracterizate prin coordonate spațiale (latitudine, longitudine, altitudine), informații de cap compas și comenzi prestabilite (decolare, orbită, aterizare, întoarcere la lansare, etc.)

Proiectarea unei rute de zbor care să fie, în primul rând, sigură și în al doilea rând utilă în detectarea descărcării Corona, a devenit unul dintre aspectele importante ale acestei teze de doctorat. În realizarea traseului de zbor trebuie să se țină cont de următorii factori:

- altitudinea la care se zboară;
- relieful;
- obstacole apărute pe traseul de zbor.

Ținând cont de factorii enumerați mai sus, s-a realizat o rută de zbor care urmează să fie încărcată în memoria pilotului automat. Această rută reprezintă o porțiune din linia de înaltă tensiune de 400 kV Brașov - Gutinaș și se află situată la ieșirea din localitatea Podu Oltului, la granița dintre județul Brașov și județul Covasna, așa cum este reprezentat în figura 3.11:

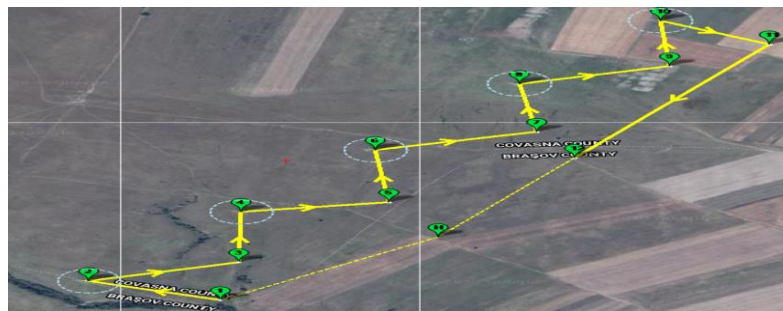


Fig. 3.11. Proiectarea traseului de zbor pe LEA

În fig. 3.12, este prezentată aceeași rută de zbor ca în fig. 3.11., dar imaginea este mărită astfel încât să se poată vedea o porțiune din traseul de zbor, scoțând în evidență stâlpii de înaltă tensiune la coordonatele cărora s-au configurat puncte de zbor (waypoint-urile).

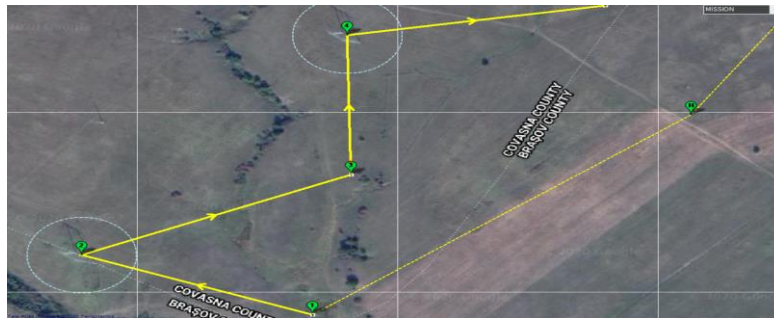


Fig. 3.12. Porțiune din traseul de zbor (imagine mărită)

Trebuie specificat faptul că, pentru realizarea de zboruri care au ca scop fotografierea aeriană sau survolarea unor elemente de infrastructură critică, cum sunt liniile de înaltă tensiune, este necesară eliberarea unui certificat de aprobare a zborului care trebuie primit de la ORNISS (Oficiul Registrului Național al Informațiilor Secrete de Stat).

III.1.3. Proiectarea sistemului de avioane fără pilot (UAS)

În acest subcapitol este prezentată proiectarea soluției tehnice și testarea în zbor a unui UAV cu aripă fixă experimental, propulsat de un motor electric. Trebuie menționat faptul că, în cazul unui UAV cu aripă fixă, corelarea între performanțele aerodinamice și stabilitate nu este ușor de realizat. Procesul de proiectare începe cu definirea cerințelor de performanță, incluzând viteza minimă de angajare, viteza maximă de zbor, altitudinea de croazieră, plafonul maxim de zbor și viteza. Astfel că, suprafața aripii, masa și propulsia UAV-ului sunt determinate pe baza cerințelor de autonomie de zbor și sarcină utilă. De asemenea, cerințele legate de propulsie, determină dimensiunea motorului, iar proiectarea aerodinamicii și stabilitatea UAV-ului sunt obținute pe baza unui profil aerodinamic ales.

Ținând cont de tipul de misiune îndeplinit, caracteristicile tehnico-tactice ale sistemului UAV proiectat sunt prezentate în tabelul 8:

Tabelul 8: Caracteristici tehnico-tactice le sistemului UAV

Nr. Crt.	Denumire caracteristică tehnico-tactică	Valoare caracteristică	Observații
1.	Viteza minimă de angajare	10 m/s	Este viteza minima la care UAV-ul nu se mai poate susține în zbor
2.	Viteza minima de zbor	12 m/s	-
3.	Viteză de croazieră	14 m/s	Este folosită atunci când UAV-ul se deplasează între stâlpii de înaltă tensiune
4.	Altitudine de croazieră	100 m	Altitudinea de siguranță în care UAV-ul poate evita obstacolele din teren
5.	Greutate sarcină utilă	1 kg	Greutatea camerei + greutatea gimbal-ului = greutate sarcină utilă
6.	Propulsie	electrică	-
7.	Timp minim de zbor	2 h	Timpul este suficient pentru survolarea unui traseu de LEA astfel încât ca UAV-ul să rămână în LOS
8.	Raza minimă a orbitei	15 m	Raza orbitei deasupra stâlpilor

III.1.3.1. UAV-ul

Vectorul aerian (UAV-ul) are cel mai important rol în momentul executării de zboruri deasupra liniilor de înaltă tensiune. La alegerea sistemului UAV au fost luate în calcul, pe lângă, caracteristicile tehnico-tactice din tabelul 8 și caracteristici fizice precum o aripă cu suprafața portantă mare, spațiu suficient de mare pentru amplasarea sarcinii utile și a sistemelor electronice ambarcabile. Zerorizarea suprafețelor de comandă și dispunerea corectă a greutateii la bord sunt parametrii de bază ce trebuie luați în calcul în momentul pregătirii de zbor a unui UAV. Având în vedere caracteristicile prezentate mai sus, sistemul UAV ales pentru a transporta senzorul optic în scopul inspecțiilor pe liniile de înaltă tensiune se numește Sky Walker.



Fig. 3.13. Sky Walker UAV

În urma unui studiu comparativ cu alte sisteme UAV din aceeași clasă, UAV-ul Sky Walker s-a pliat cel mai bine pe cerințele exprimate în tabelul 8, devenind cea mai bună alegere pentru misiuni de survolare a liniilor electrice de înaltă tensiune cu scopul detectării descărcării Corona.

III.2. Proiectarea și simularea numerică a sistemului de control al altitudinii UAV-ului pentru zbor pe LEA

Pentru îndeplinirea cu succes a zborurilor pe liniile electrice aeriene de înaltă tensiune este esențial ca UAV-ul să își păstreze altitudinea prestabilită, indiferent de modificările celorlalte variabile de stare ale modelului matematic.

Controlul pozițiilor centrului de masă în sistemul de coordonate legat de Pământ (p_n, p_e, p_d) și a unghiurilor de atitudine (Φ, Θ, Ψ) ale UAV-ului reprezintă unul dintre scopurile de bază în construcția unui sistem de control.

III.2.1. Particularizarea modelului matematic al UAV-ului Sky Walker

Cu scopul simplificării sistemului de ecuații, se fac următoarele aproximări pentru care mișcarea UAV-ului are la bază ipoteza mișcării în plan vertical, pentru care :

- unghiul de glisadă este nul, $\beta = 0$
- viteza unghiulară pe planul de simetrie este nulă, $p = 0$
- forța laterală este nulă, $f_y = 0$.

În proiectarea sistemului de control al altitudinii, a fost descris matematic canalul longitudinal, iar ca structură de reglare este folosită metoda de reglare în cascadă, cu diferite tipuri de controlere clasice.

Sistemul de ecuații de la care pornește proiectarea sistemului de control al altitudinii UAV-ului, pe canalul longitudinal, este următorul [143]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{v} = \frac{T \cos \alpha}{m} - \frac{\rho v^2 SC_x}{2m} - g \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{T \sin \alpha}{mv} + \frac{\rho v SC_z}{2m} - \frac{g \cos \theta}{v} \\ \dot{q} = -\frac{\rho v^2 b SC_{m_\alpha} \alpha}{2J_y} - \frac{\rho v b^2 SC_{m_q} q}{2J_y} + \frac{\rho v^2 b SC_{m_\delta} \delta_p}{2J_y} \\ \dot{h} = v \sin \theta \\ \dot{\phi} = q \\ \theta = \phi - \alpha \end{array} \right. \quad (3.6.43)$$

Ecuațiile modelului matematic al canalului longitudinal (3.6.43) stau la baza modelării aeronavei Sky Walker în Matlab. Astfel că, folosind datele inițiale (3.6.44) și ecuațiile (3.6.43), se determină coeficienții structurii de reglare.

Datele inițiale de la care se pornește sunt următoarele:

$$\begin{array}{l} v_0 = 10m/s \\ h_0 = 50m \\ S = 0.4m^2 \\ b = 1.68m \\ m = 4.5kg \\ L = 1.49m \end{array} \quad (3.6.44)$$

Datele inițiale (3.6.44), sunt specifice UAV-ului Sky Walker modelat în software-ul Solidworks conform dimensiunilor fizice și prezentat în fig. 3.22.

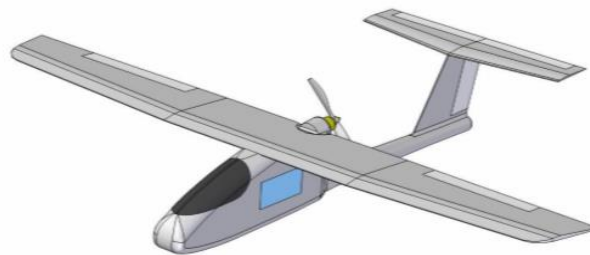


Fig. 3.22. Modelarea UAV-ului Sky Walker în software-ul Solidworks

Modelarea în Solidworks a fost necesară pentru determinarea valorilor derivatelor de stabilitate ale UAV-ului. Astfel că, după modelarea în Solidworks, fuselajul, aripile, ampenajul vertical și ampenajul orizontal au fost împărțite în câte 20 de secțiuni, deoarece coordonatele acestor secțiuni au fost folosite în generarea unui fișier, fiind, ulterior, procesat în software-ul DatCom (Data Compendium), realizat de NASA și folosit, la liber, de inginerii de aviație.



Fig. 3.23. Determinarea derivatelor de stabilitate ale UAV-ului cu ajutorul software-ului DatCom

Întotdeauna, pe parcursul calculului coeficienților aerodinamici ai UAV-ului, s-a ținut cont că, misiunea principală a acestui UAV este monitorizarea și detectarea descărcării Corona de pe liniile de înaltă tensiune, ceea ce presupune o dotare foarte bună din punct de vedere al echipamentelor de bord, din cauza pericolului la care este expus UAV-ul, zburând destul de aproape de aceste linii și într-un câmp electromagnetic foarte intens.

III.2.2. Modelarea canalului longitudinal in Matlab/Simulink

Modelarea în Matlab a UAV-ului Sky Walker, pornește de la cele 6 ecuații ale modelului matematic descris de sistemul (3.6.43), la care se adăugă o funcție de calcul a densității aerului și mai multe blocuri de afișare a semnalelor.

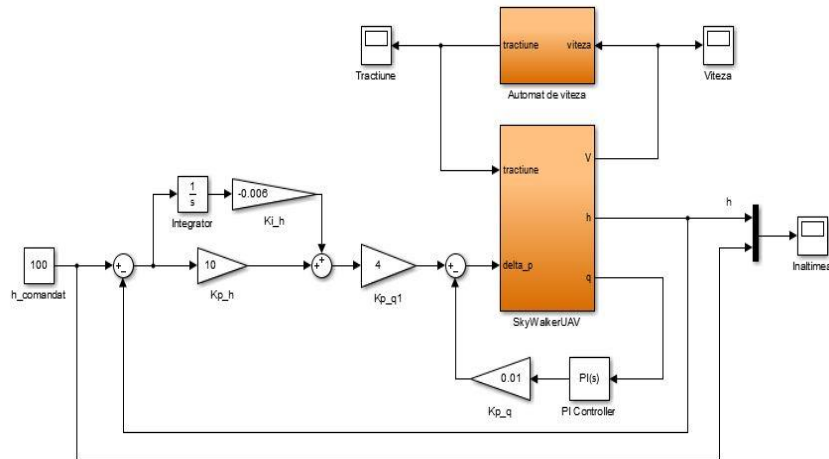


Fig. 3.24. Sistemul de control al altitudinii în Matlab-Simulink

În fig. 3.24. se poate observa altitudinea comandată, $h_comandat=100m$. Presupunând că UAV-ul este în zbor la o altitudine prestabilită, $h_0=50m$, atunci sistemul de control al altitudinii pornește de la valoarea inițială a altitudinii, $50m$ și va ajunge să se stabilizeze la înălțimea de $100m$.

În blocul din Simulink, „SkyWalkerUAV”, sunt introduse ecuațiile (3.6.43) reprezentând modelul matematic pe canalul longitudinal al UAV-ului SkyWalker, prezentat în fig. 3.25. De asemenea, pentru a menține altitudinea comandată sunt folosite 2 bucle de reacție negativă reprezentate de 2 controlere PI și 2 componente de amplificare reprezentate prin constantele de proporționalitate $k_{p_q}=0.01$, $k_{p_q1}=4$.

De asemenea, tot pentru controlul altitudinii este folosit un automat de viteză care cunoscând viteza inițială, sau de referință și viteza comandată, folosește valoarea de ieșirea a automatului de viteză, reprezentată de tracțiune pentru a stabili altitudinea reală a UAV-ului cu cea comandată.

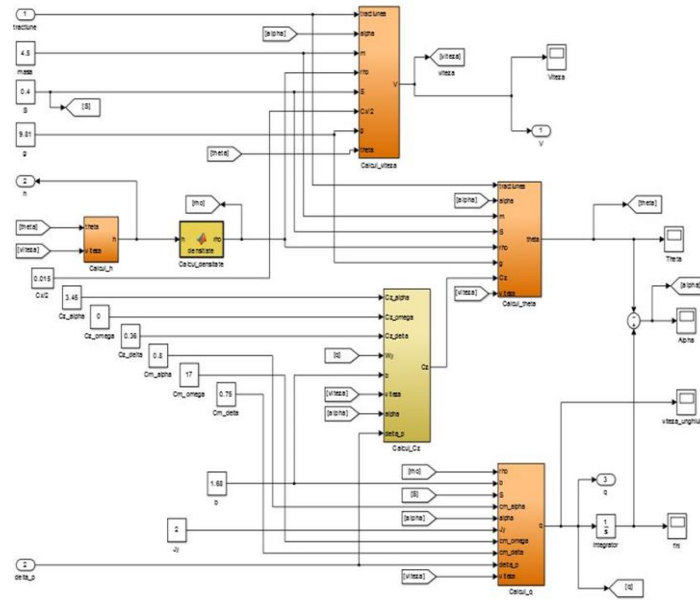


Fig. 3.25. Dinamica UAV-ului Sky Walker pe canalul longitudinal

III.2.3. Proiectarea automatului de viteză

Pentru a utiliza structurile de comandă cu constrângerea vitezei de zbor a fost necesară implementarea unui automat de viteză care să mențină viteza constantă. Practic, automatul de viteză menține viteza constantă cu ajutorul comenzii pe tracțiune.

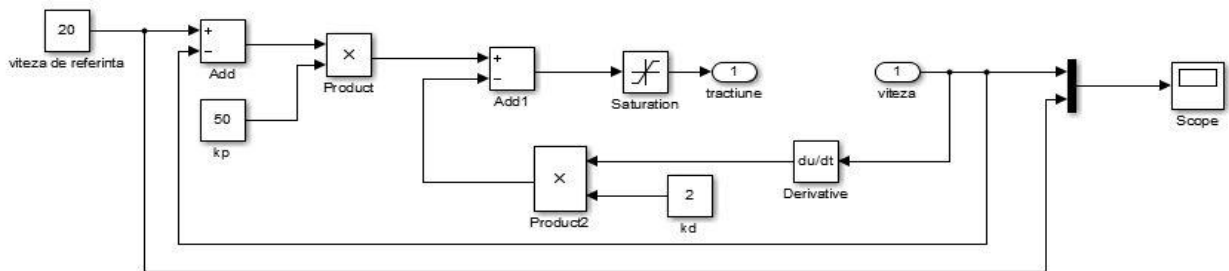


Fig. 3.31. Schema bloc a automatului de viteză

Din diagrama prezentată în fig. 3.31, se observă că controlul tracțiunii se realizează cu ajutorul unui controler de tip PD, cu două bucle de reacție: una după derivata vitezei și una după viteză. Coeficientul componentei derivate este notat cu k_d , iar coeficientul componentei proportionale este notat cu k_p . Valorile coeficienților $k_d=2$ și $k_p=50$ au fost determinate prin încercări multiple, urmărind evoluția sistemului.

Comportarea structurii de reglare de tip PD, se poate analiza prin utilizarea unui bloc de tip „Scope”:

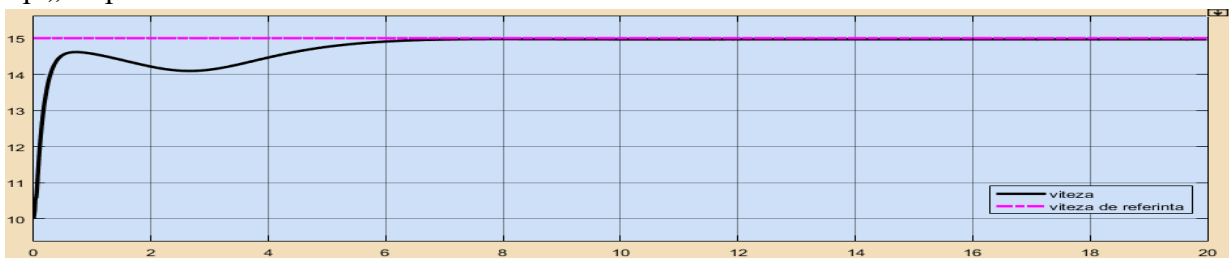


Fig. 3.32. Menținerea constanta a vitezei comandate la valoarea de 15 m/s

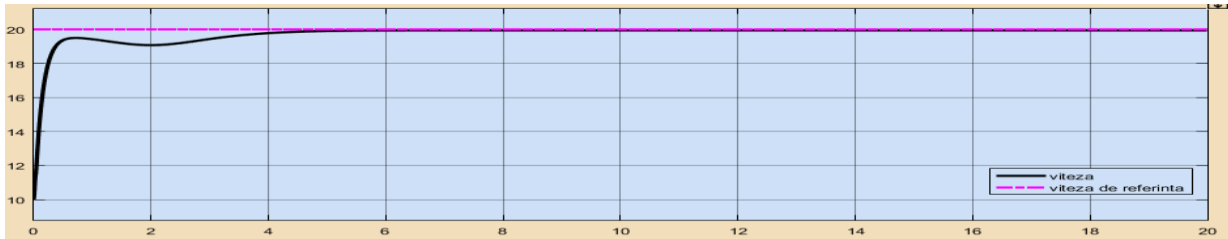


Fig. 3.33. Menținerea constantă a vitezei comandate la valoarea de 20 m/s

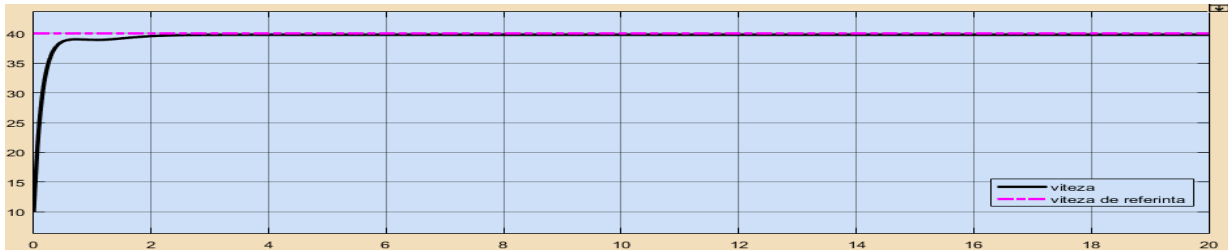


Fig. 3.34. Menținerea constantă a vitezei comandate la valoarea de 40 m/s

În urma analizei celor 3 grafice care indică stabilizarea vitezei de zbor comandate la 15 m/s, 20 m/s, respectiv 40 m/s, având în vedere că, în momentul comenzi, UAV-ul are o viteză de zbor constantă de 10 m/s, se poate concluziona că, cu cât diferența dintre viteza comandată și cea de referință este mai mare, cu atât sistemul este mai stabil. Acesta lucru poate fi argumentat prin faptul că, imediat ce motorul UAV-ului crește turația pentru a ajunge la viteza comandată, cu cât aceasta este mai apropiată de viteza de referință, cu atât îi este mai greu UAV-ului să se stabilizeze pe noua viteză.

În graficul din fig. 3.35, se observă, din diagrama tracțiunii, că aceasta are o creștere bruscă în momentul în care este acționată, pentru a ajunge la altitudinea comandată, apoi se stabilizează la o valoare $T=3N$, care este suficientă pentru menținerea în aer a UAV-ului Skywalker.

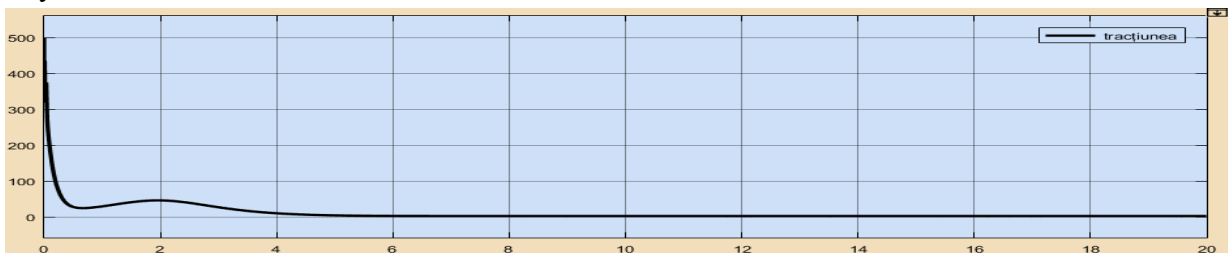


Fig. 3.35. Evoluția tracțiunii la comanda pe altitudine în N (Newton)

Cu ajutorul metodei de reglare în cascadă, modelul matematic al canalului longitudinal al UAV-ului Skywalker a fost stabilizat prin utilizarea a 2 controlere de tip PI (fig. 3.28) și a 2 componente proporționale $k_{p_q}=0.01$, $k_{p_q1}=4$.

Componentele controlerului PI dispus pe buclă de reacție negativă interioară au fost determinate cu ajutorul funcției Matlab „PID-Tuning”, și are următoarele valori: $K_p=177.8$ și $K_i=70292.3$.

Componentele controlerului PI, dispus pe canalul de comandă, au fost determinate prin încercări successive, în funcție de comportarea sistemului. Acestea au următoarele valori: $K_{p_h}=10$ și $K_{i_h}=-0.006$.

III.2.4. Rezultate numerice obținute

În urmă determinării componentelor structurilor de reglare folosite, rezultatele obținute sunt prezentate în graficele următoare:

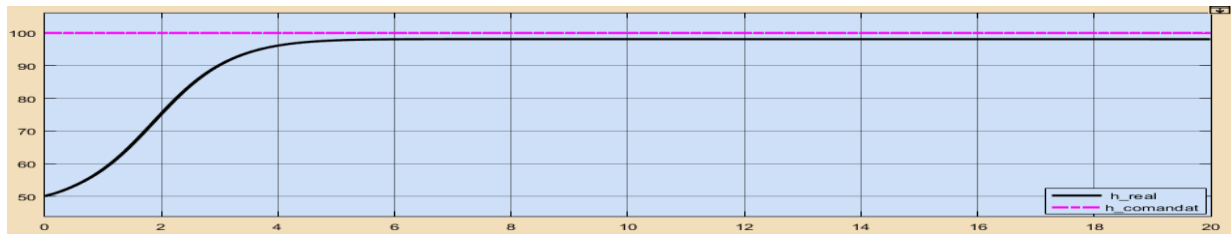


Fig. 3.36. Stabilizarea altitudinii de zbor (în metri)

În figura 3.46, se observă cum graficul altitudinii pornește de la altitudinea inițială $h_0=50\text{m}$ și se stabilizează aproape de altitudinea comandată $h_{\text{comandat}}=100\text{m}$ după un timp $t=5\text{s}$. De asemenea, se observă că există o eroare staționară, în banda de stabilizare, care are o valoare de 1,98 %, ceea ce înseamnă că din 100 m, altitudinea la care UAV-ul trebuie să zboare, acesta atinge altitudinea de zbor de aproximativ 98,2 m.

Trebuie specificat faptul că, această eroare poate fi eliminată prin fuziunea datelor de la barometru cu datele de la sistemul GPS/RTK dispus pe UAV-ul Sky Walker.

Evoluția unghiului de tangaj θ , a unghiului de incidență α și a unghiului de ruliu φ , poate fi analizată în următoarele grafice:

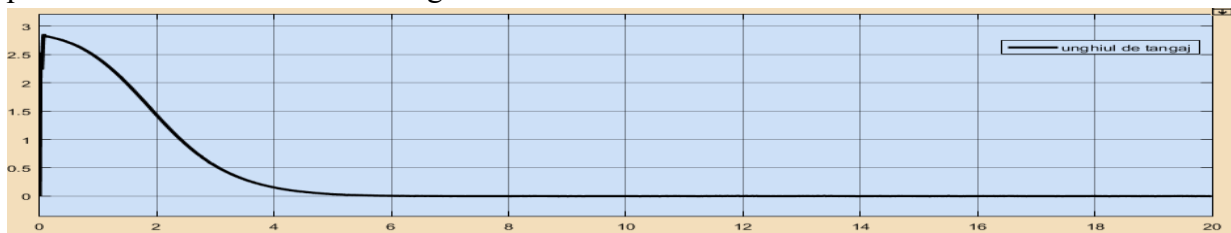


Fig. 3.37. Evoluția unghiului de tangaj (în grade)

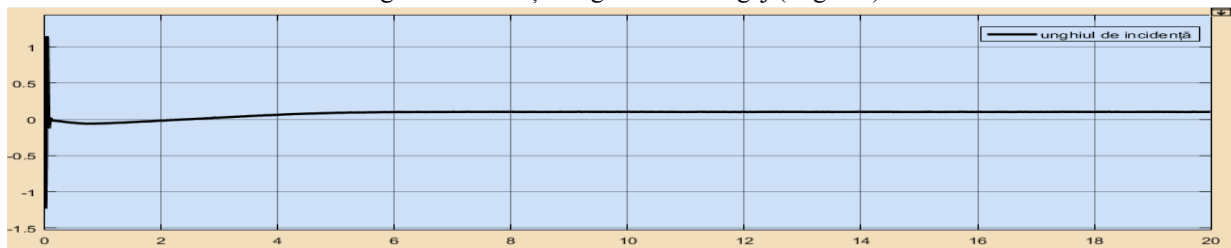


Fig. 3.38. Evoluția unghiului de incidență (în grade)

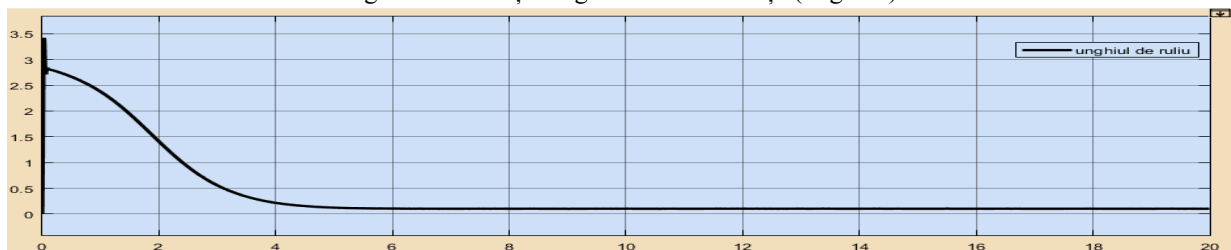


Fig. 3.39. Evoluția unghiului de ruliu (în grade)

În concluzie, proiectarea sistemului de control al altitudinii prin stabilizarea UAV-ului pe canalul longitudinal, a fost realizată cu succes, altitudinea comandată fiind atinsă într-un timp foarte scurt de UAV-ul proiectat.

IV. ANALIZA DATELOR DE ZBOR ALE SISTEMULUI UAV DE MONITORIZAREA A LEA

Misiunile îndeplinite de sistemul de avioane fără pilot Sky Walker, trebuie să se concretizeze prin înregistrarea de date de zbor care ulterior vor fi procesate și analizate în vederea extragerii, a caracteristicilor de interes, de la senzorii dispuși la bordul UAV-ului, contribuind decisiv la siguranța zborului.

În urma realizării, la capitolul anterior, a unui traseului de zbor pe o linie de înaltă tensiune de 400 kV, în acest capitol traseul de zbor a fost încărcat în memoria autopilotului, împreună cu componentele structurilor de reglare determinate în cadrul proiectării sistemului de control al altitudinii, iar UAV-ul a realizat mai multe zboruri pe LEA, atât pentru calibrare și testare, cât și pentru detectarea efectivă a descărcării Corona. Parametrii de zbor în urma unuia dintre aceste zboruri sunt analizați în acest capitol.

IV.1. Analiza datelor de zbor ale UAV-ului proiectat

Pentru testarea capacităților de zbor ale UAV-ului peste liniile de înaltă tensiune, s-au executat mai multe zboruri de verificare, pe un tronson, format din 5 stâlpi, al liniei electrice aeriene Brașov – Gutinaș, la granița județelor Brașov și Covasna. În urma zborurilor, datele unuia dintre ele au fost descărcate și analizate ducând la rezultate foarte bune ce sunt prezentate în acest capitol.

Astfel că, în urma zborului, datele specifice au fost analizate și s-au constatat variații mici ale altitudinii (de aproximativ 5 m) induse de direcția vântului, viteza de croazieră a rămas relativ constantă și s-a stabilizat la aproximativ 16 m/s (57 km/h), ceea ce face ca sistemul să fie indicat pentru zborul pe linii de înaltă tensiune, deoarece este nevoie ca viteza de croazieră să fie cât mai mică, astfel încât să faciliteze captarea imaginilor Corona la o calitate cât mai bună.

În fig. 4.10 se observă, în funcție de culoare (roz, roșu și galben), modurile de zbor prestabilite și încărcate în memoria pilotului automat, odată cu ruta de zbor. Astfel că, UAV-ul a fost decolat în modul AUTO – culoarea roz, specific zborului automat pe traiect, apoi când a încheiat misiunea de survolare a celor 5 stâlpi ai LEA, a trecut în modul RTL (Return To Land) – culoarea roșie, mod care obligă UAV-ul să se întoarcă din locul de unde a fost decolat. Ultimul mod de zbor utilizat este cel MANUAL – culoarea galbenă. Acesta a fost folosit la aterizarea UAV-ului, ca măsură de protecție împotriva terenului accidentat specific zonei din care s-a executat zborul.



Fig. 4.10. Ruta de zbor executată de sistemul UAV proiectat

În afară de modurile de zbor selectate, în funcție de lungimea segmentului specific fiecărui punct de pe traseu înregistrat, se poate observa diferența de altitudine în diferite faze ale zborului, iar în fig. 4.11. se observă o suprapunere exactă a orbitelor executate de sistemul UAV, deasupra stâlpilor de înaltă tensiune, dar și o menținere precisă a altitudinii de zbor.

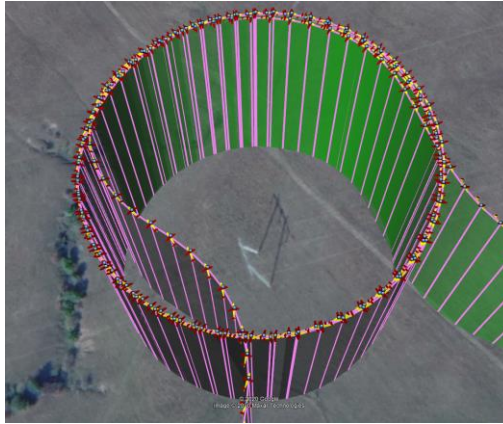


Fig. 4.11. Executarea orbitelor deasupra stâlpilor de înaltă tensiune

IV.2. Rezultate experimentale obținute în urma analizei parametrilor de zbor

Prin analiza parametrilor de zbor se verifică veridicitatea datelor de la senzorii de zbor (accelerometru, giroscop, magnetometru și barometru) astfel încât datele injectate în blocul de calcul al distanței la țintă, care va fi prezentat în capitolul următor, să fie corecte.

De asemenea, componentele de reglare ale sistemului de control al altitudinii bazat pe automatul de viteză, calculate la capitolul anterior, au fost integrate pe autopilot, pentru validarea experimentală a simulării numerice, iar rezultatele sunt prezentate cu ajutorul graficelor: turația motorului vs viteza de zbor fig. 4.13 și turația motorului vs altitudine fig. 4.14. De asemenea, un grafic de ansamblu, care să cuprindă toți parametrii analizați care stau la baza controlului altitudinii și stabilizarea canalului longitudinal este prezentat în fig. 4.15.



Fig. 4.13. Turația motorului vs viteza de zbor

În fig. 4.13. turația motorului se modifică odată cu viteza de zbor, astfel încât aceasta să rămână, pe cât posibil, constantă. Variația vitezei de zbor apărută în grafic este cauzată de factorii externi reprezentați de viteza vântului pe axa y.



Fig. 4.14. Turația motorului vs altitudine

În fig. 4.14. se observă cum turația motorului variază pentru a păstra constantă altitudinea, iar la trecerea din modul de zbor AUTO în modul de zbor RTL, se observă o reducere a turației pentru ca UAV-ul să scadă altitudinea și să intre pe faza de aterizare.

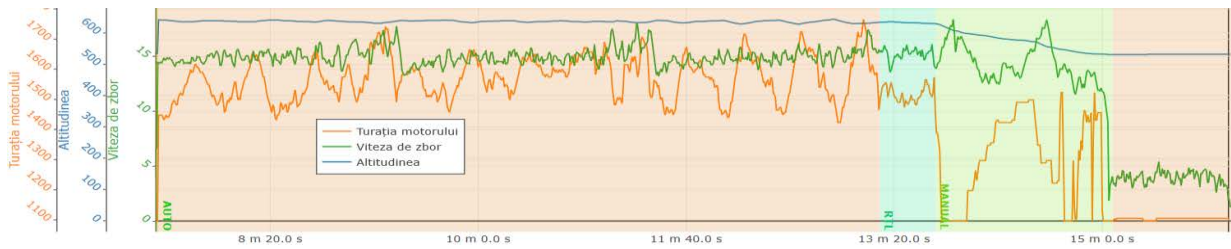


Fig. 4.15. Turația motorului vs viteza de zbor vs altitudine

În fig. 4.15. este prezentat graficul dintre turația motorului, viteza UAV-ului față de fileurile de aer și altitudinea de zbor. Se vede clar că automatul de viteză funcționează corespunzător, deoarece variază turația motorului pentru a păstra constantă viteza și implicit altitudinea care este analizată din punct de vedere al erorilor în fig. 4.16, prezentând erori mici care nu pun în pericol siguranța zborului.

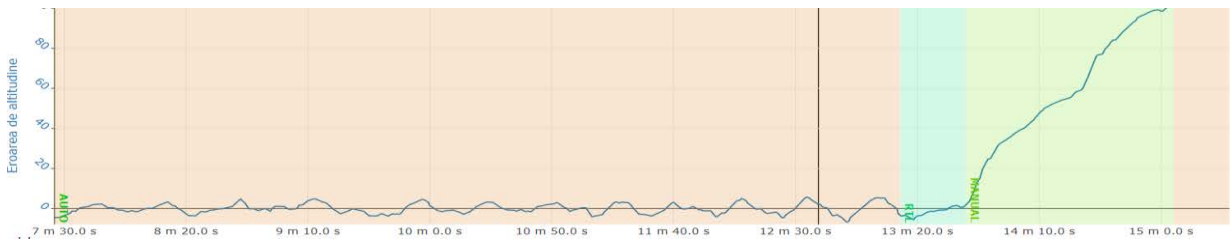


Fig. 4.16. Eroarea de altitudine

În ceea ce privește atitudinea în zbor a UAV-ului și răspunsul sistemului la comenzile primite, în figurile 4.17, 4.18 și 4.19 sunt prezentate erorile, care sunt foarte mici, referitoare la unghiurile lui Euler (unghiurile de atitudine), și anume, unghiul de ruluu, unghiul de tangaj și unghiul de girație. Astfel că, conform graficelor, diferențele dintre unghiurile comandate și unghiurile executate de sistemul UAV, sunt foarte mici, ceea ce denotă o stabilitate foarte bună a UAV-ului la zborul pe traiect, cât și în fazele de aterizare și decolare.

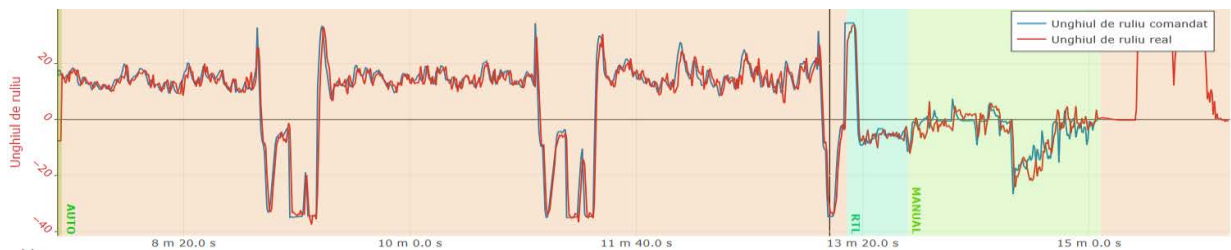


Fig. 4.17. Unghiul de ruluu comandat vs unghiul de ruluu real

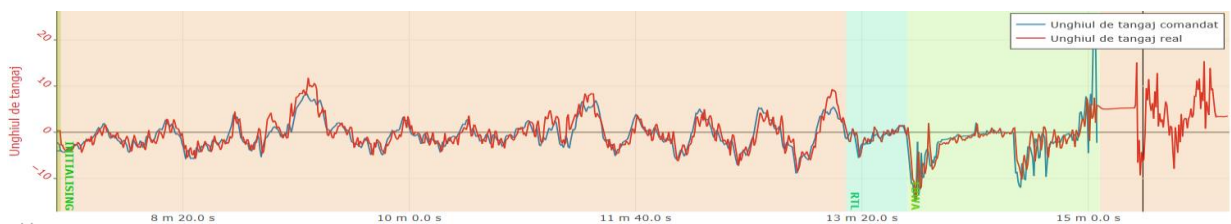


Fig. 4.18. Unghiul de tangaj comandat vs unghiul de tangaj real

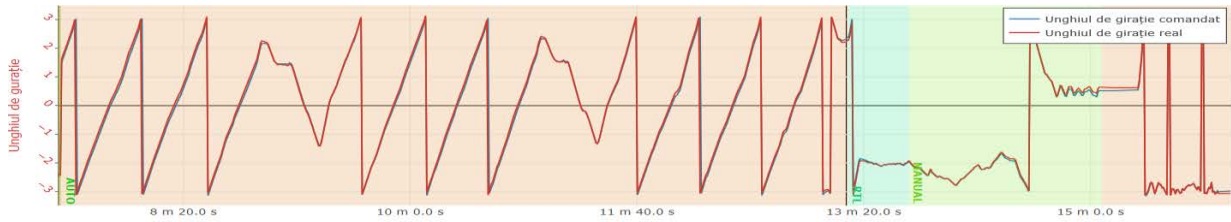


Fig. 4.19. Unghiul de rotație comandat vs unghiul de rotație real

În fig. 4.20. se observă că viteza față de sol dată de senzorul barometric și viteza față de fileurile de aer dată de tubul Pitot care este conectat la un senzor de presiune diferențială, prezintă similitudini mari, iar diferența mică dintre ele este cauzată de viteza rafalelor de vânt și a curenților de aer.

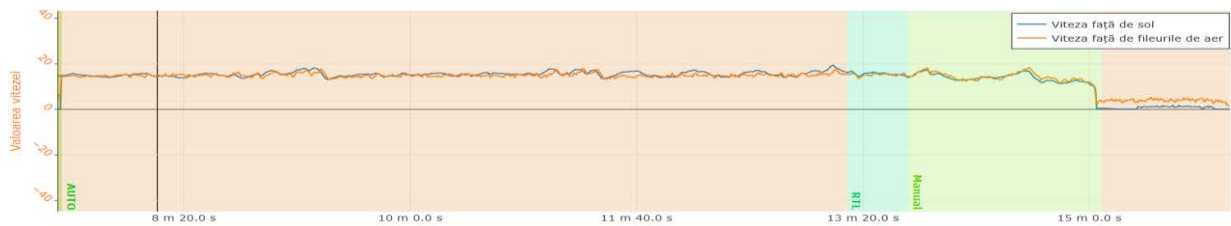


Fig. 4.20. Viteza față de sol vs viteza față de fileurile de aer (Pitot)

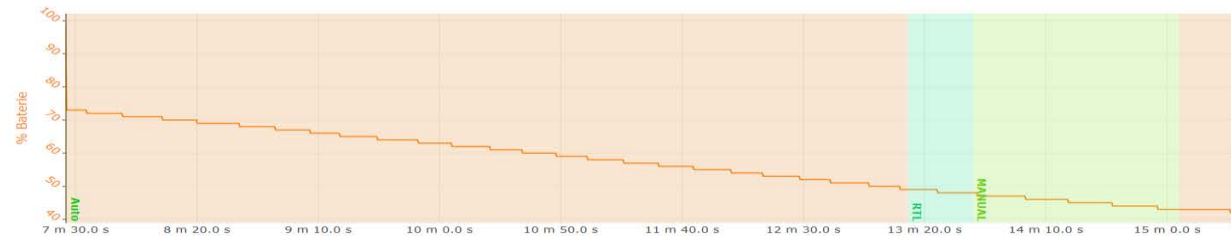


Fig. 4.21. Rata de consum a acumulatorului

Din graficul care prezintă rata de consum a acumulatorului se poate concluziona că bateria LIPO folosită la alimentarea sistemului a scăzut cu 30% după 9 minute de zbor, făcând ca sistemul să aibă o autonomie totală de zbor de, aproximativ, 30 minute. Având în vedere că zborul executat nu și-a propus o autonomie de zbor mare ci doar demonstrarea stabilității UAV-ului în aer, pentru îmbunătățirea anduranței de zbor se ia în considerare proiectarea unui sistem UAV cu motor termic, care poate sta în aer peste 10 ore.

Din analiza prametrilor UAV-ului și comportamentului acestuia în cazul unui zbor real pe liniile de înaltă tensiune se poate afirma faptul că sistemele UAV cu aripă fixă sunt recomandate pentru zbor pe LEA, se comportă stabil, senzorii de la bord nu sunt influențați de câmpul electromagnetic al liniei, astfel că acest tip de sistem nu prezintă pericol pentru integritatea fizică a LEA și nici a operatorului sistemului.

În concluzie, sistemul UAV proiectat a răspuns foarte bine la testele de calibrare, la zborul de verificare și, în final, la misiunea de survolare a unui tronson format din 5 stâlpi ai liniei electrice de înaltă tensiune de 400 kV, Brașov - Gutinaș, dovedind stabilitate în zbor și siguranță în exploatare.

V. ANALIZA DATELOR VIDEO RECEPȚIONATE DE LA SENZORUL OPTIC DISPUS LA BORDUL UAV

Procesarea video în timp real pe baza datelor obținute de la o cameră Corona reprezintă principalul obiectiv al zborului, cu sistemul UAV proiectat, pe liniile electrice de înaltă tensiune. Procesarea video are loc la bordul UAV-ului, în timp real și constă în procesarea, analiza și clasificarea cadru cu cadru extras din semnalul video furnizat de senzorul optic dispus la bordul UAV-ului cu scopul identificării existenței descărcării Corona pe linia de înaltă tensiune analizată cât și localizarea acesteia pentru efectuarea intervențiilor de mentenanță ulterioare. În fig.5.2. este prezentată schema bloc a fluxului datelor video la bodul sistemului UAV Sky Walker:

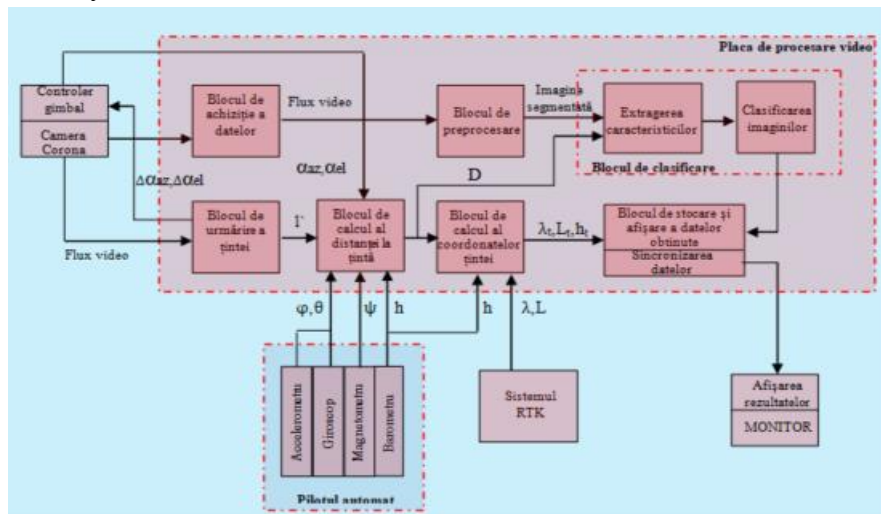


Fig. 5.2. Schema bloc a software-ului CDC

V.1. Blocul de achiziție a datelor

Achiziția datelor se face de la camera Corona dispusă la bordul UAV-ului, apoi semnalul este preluat de blocul de achiziție a datelor, reprezentând prima etapă a procesului de extragere a caracteristicilor descărcării Corona dintr-un flux video. Transmitia semnalului video de la cameră la placa de procesare se realizează cu ajutorul protocolului de comunicații MIPI-CSI care conectează decodorul video atașat la cameră cu placa de procesare Nvidia TX2 pe care rulează software-ul CDC.

Pentru a reduce timpul de calcul și pentru a eficientiza algoritmul proiectat, cadrul video brut, extras din fluxul video livrat de cameră, este convertit automat în format *grayscale*.

În fig. 5.3. este prezentată transformarea de la o imagine color la o imagine grayscale cu ajutorul *metodei strălucirii* ($\text{Grayscale_pixel} = 0.21 R + 0.72 G + 0.07 B$).



Fig. 5.3. Trecerea de la o imagine color la o imagine grayscale

De asemenea, majoritatea soft-urilor de analiză și procesare de imagine folosesc metoda strălucirii ca funcție presetată.

V.2. Blocul de preprocesare

În blocul de preprocesare fiecare cadru video este analizat în vederea identificării și izolării pixelilor care pot indica apariția descărcării Corona. Pentru realizarea acestei izolări a regiunii de interes, s-a aplicat un filtru median de estompare (blur median filter) [146] și un filtru de prag care reduce imaginea la valori ale pixelilor de 0 și 1. Cu 0 sunt reprezentați pixeli care indică fundalul imaginii (adică pixeli negri), iar cu valoarea 1 sunt reprezentați pixelii care indică descărcarea Corona în imagine (pixeli albi).

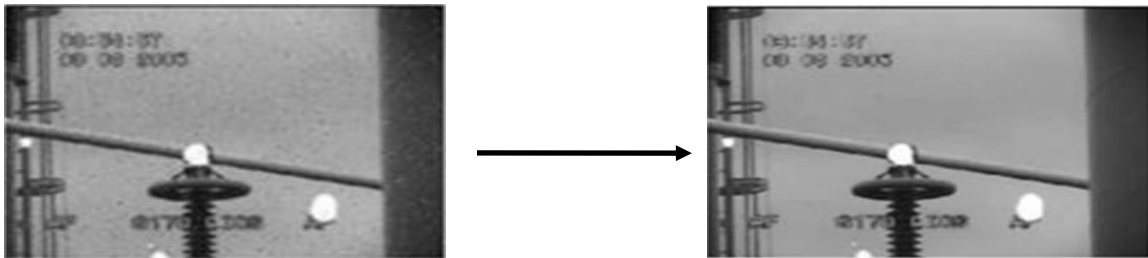


Fig. 5.4. Aplicarea unui kernel cu dimensiunea 3x3 pentru eliminarea zgomotului

Cu ajutorul aplicării unei măști (kernel) peste imaginea procesată și cu ajutorul algoritmilor de convoluție se poate îmbunătăți substanțial o imagine astfel încât extragerea caracteristicilor de interes, adică pixelii albi din imagine care indică existența descărcării Corona să se poată executa mult mai facil. În fig. 5.4. este prezentată o imagine îmbunătățită, asupra căreia s-a aplicat un kernel cu dimensiunea de 3x3 [148].

În ceea ce privește transformarea dintr-o imagine *grayscale* într-una binară, a fost aleasă o limită inferioară (o valoare de prag) de 250, adică orice valoare a pixelilor mai mică de 250 devine un pixel negru (valoare de 0). Această valoare a fost aleasă după mai multe încercări, deoarece nu se dorește ca pixelii gri din imagine (cu valori mai mici de 250) să se identifice cu pixelii specifici descărcării Corona, dar de asemenea, s-a luat în considerare că descărcarea Corona nu poate fi reprezentată de pixeli perfect albi (cu o valoare de exact 256), deoarece nu există un alb perfect într-un cadru din natură.

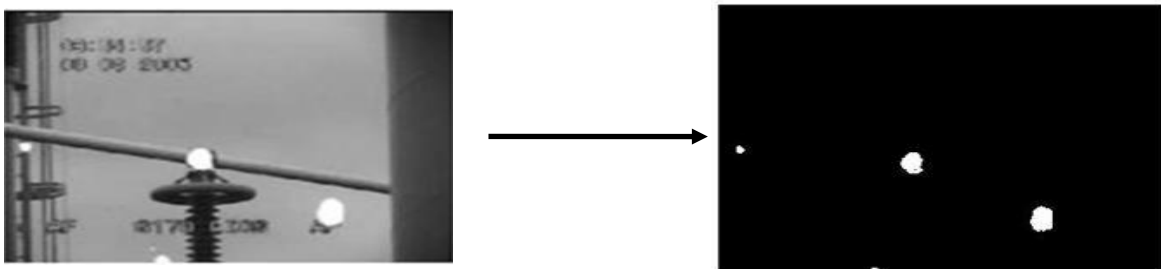


Fig. 5.5. Imagine binară rezultată în urma procesului de segmentare

În figura 5.5, este prezentată trecerea dintr-o imagine *grayscale* îmbunătățită, într-o imagine segmentată asupra căreia s-a aplicat o valoare de prag de 250.

Principalul motiv care a dus la utilizarea celor 2 metode de procesare de imagine: filtru median și metoda pragului este justificat prin faptul că petele albe care apar în imagine,

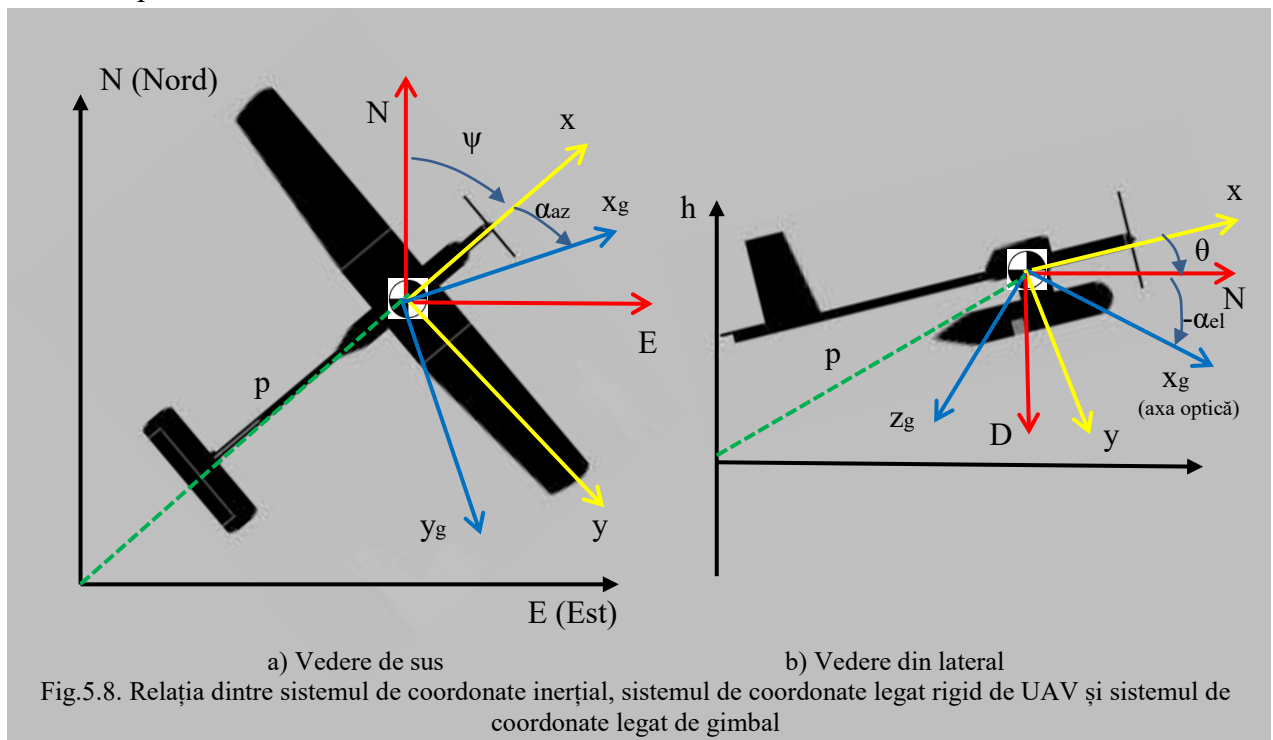
identificate ca fiind descărcarea Corona, sunt greu de determinat și atunci nu pot fi identificate ca obiect.

V.3. Blocul de calcul al distanței la țintă

Pentru a crește precizia în cazul determinării volumului de pixeli albi din imagine, iar existența apariției ionizării aerului din jurul conductorului să fie corect estimată, este necesară cunoașterea, în timp real, a distanței de la senzorul optic dispus pe UAV și ținta de interes, selectată manual de la stația terestră de control, reprezentată de conductorul electric supus descărcării Corona.

Prima etapă în determinarea distanței dintre UAV și locul de apariției al descărcării Corona este reprezentată de stabilirea unei legături între sistemele de coordonate ale UAV-ului și sistemele de coordonate legate de senzorul optic.

În figura 5.8, este prezentată relația dintre sistemul de coordonate inerțial, sistemul de coordonate legat rigid de UAV și sistemul de coordonate legat de sistemul de stabilizare al camerei (gimbal). Așadar, pentru a trece din sistemul de coordonate legat rigid de UAV în sistemul de coordonate legat de senzorul optic sau cameră, trebuie luate în considerare 3 sisteme de coordonate de trecere intermediare: $S_{g1}=(x_{g1}, y_{g1}, z_{g1})$, $S_g=(x_g, y_g, z_g)$, $S_c=(x_c, y_c, z_c)$, unde S_c reprezintă sistemul de coordonate al camerei.



Un sistem de coordonate este transformat în alt sistem de coordonate folosindu-se două operații de bază: rotația și translația.

Cunoașterea matricilor de rotație care modelează trecerea din sistemul de coordonate legat de Pământ, la care se raportează coordonatele sistemului GPS/RTK, la sistemul de coordonate legat de avion, în care sunt reprezentate unghiurile de atitudine ale UAV-ului, sau la sistemul de coordonate al gimbal-ului în care este reprezentată poziția camerei Corona, este necesară pentru transmiterea și fuziunea datelor între blocurile de calcul.

V.3.1. Modelul matematic al senzorului optic (camera Corona)

Pentru a putea folosi procesarea de imagine la capacitate ridicată este necesar ca modelul matematic al senzorului optic (camera Corona) să fie determinat. De asemenea, cunoașterea caracteristicilor tehnice ale camerei joacă un rol important în determinarea descărcării Corona prin procesarea fluxului video recepționat.

În figura 5.9. este prezentat sistemul de coordonate al camerei. Așadar, în cazul zborului pe liniile de înaltă tensiune ținta este reprezentată de descărcarea Corona, deci implicit de zona izolatorilor dispuși la baza coronamentului stâlpilor. Pentru calculele viitoare ținta va fi notată cu l_t . Proiecția țintei în planul imaginii este notată cu p . Locația pixelilor cu coordonatele $(0,0)$ corespunde centrului imaginii și trebuie să fie aliniată cu axa optică a camerei. Distanța la țintă este notată cu D și este măsurată în metri.

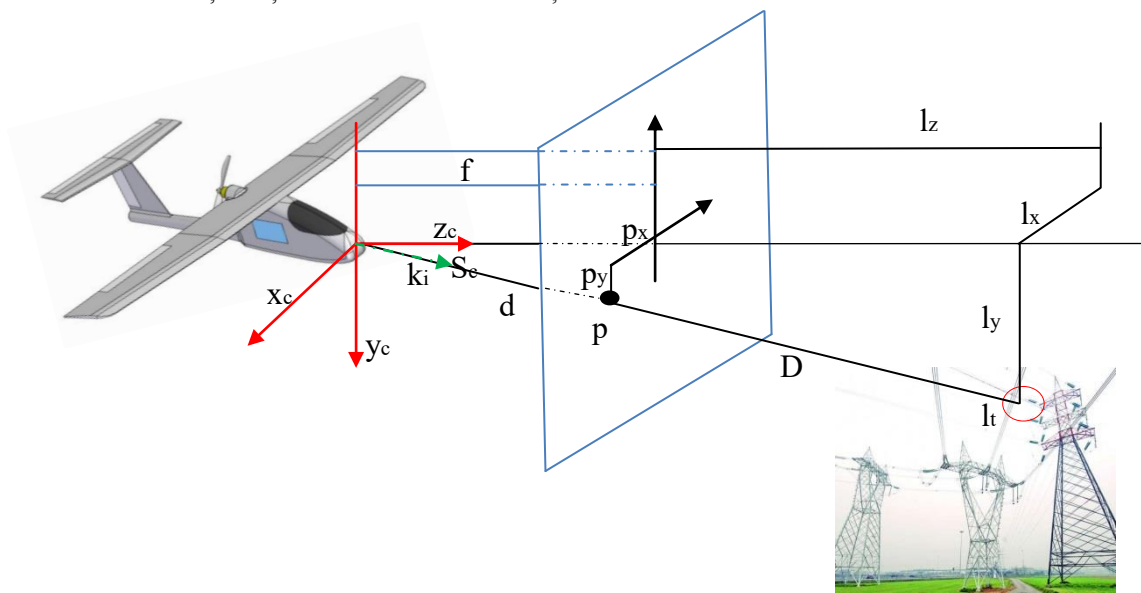


Fig.5.9. Modelul matematic al senzorului optic

Din geometrie, rezultă următoarea relație care descrie poziția țintei de interes, în coordonate inerțiale astfel:

$$p_{st}^i = p_{UAV}^i + R_{\psi\Theta\Phi} R_{\psi\Theta\Phi}^g R_g^c l_c = p_{UAV}^i + D(R_{\psi\Theta\Phi} R_{\psi\Theta\Phi}^g R_g^c l_c) \quad (5.3.41)$$

unde:

$$p_{UAV}^i = (p_n, p_e, p_d)^T$$

$$R_{\psi\Theta\Phi} = R_{\psi\Theta\Phi} = [R_\psi][R_\Theta][R_\Phi]$$

$$R_{\psi\Theta\Phi}^g = R_{\psi\Theta\Phi}^g (\alpha_{az}, \alpha_{el})$$

Din ecuația 5.3.41 se poate observa că singura necunoscută este distanța la țintă, D . Astfel că, se poate trage concluzia că rezolvarea problemei de geolocație a unei ținte se reduce la estimare distanței la țintă, D .

Pentru a determina această distanță a fost folosită metoda Modelului Pământului Plat. În figura 5.9 este reprezentată o metodă de estimare a distanței la țintă presupunând că Pământul este plat, adică relieful nu prezintă denivelări.

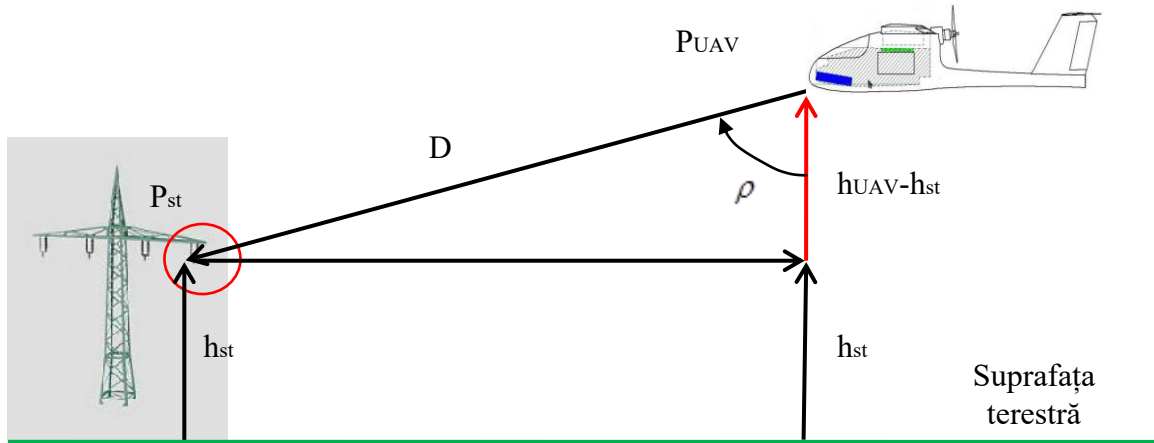


Fig.5.10. Estimarea distanței la țintă folosind metoda Pământului plat

Folosind această metodă se pot face următoarele notații: $h_{UAV} = -p_d$ este înălțimea UAV-ului în funcție de sol și ρ este unghiul dintre l (vectorul poziției relative dintre stâlpul de interes și UAV) și axa z a sistemului de coordonate inertial.

Din figura 5.10 se poate deduce următoarea relație:

$$D = \frac{h_{UAV} - h_{st}}{\cos \rho} \quad (5.3.42)$$

Unde : $\cos \rho = k_i * l' = k_i * R_{\Psi\Theta\Phi} R_{\psi\theta\phi}^g R_g^c l_c$

k_i - versorul direcției vectorului la țintă

În concluzie, distanța estimată la țintă folosind modelul Pământului plat este următoarea :

$$D = \frac{h_{UAV} - h_{st}}{k_i * R_{\Psi\Theta\Phi} R_{\psi\theta\phi}^g R_g^c l_c} \quad (5.3.43)$$

Determinarea distanței la țintă reprezintă una dintre realizările importante ale acestei lucrări, iar pentru dezvoltările ulterioare acest parametru este esențial în determinarea estimărilor privitoare la nivelul de pierderi cauzate de descărcarea Corona pe o anumită lungime a unui tronson de linie electrică aeriană.

V.4. Blocul de calcul al coordonatelor țintei

În această secțiune este prezentată o metodă de determinare a locului unde are loc descărcarea Corona în sistemul de coordonate legat de Pământ (inertial) presupunând că se folosește o camera Corona montată pe un sistem de stabilizare (gimbal), ambele fiind integrate la bordul unui UAV cu aripă fixă. Se presupune că UAV-ul este capabil să-și măsoare singur coordonatele inerțiale, cu ajutorul sistemului RTK (Real Time Kinematics) integrat la bordul acestuia și care crește precizia la ordinal centimetrilor spre deosebire de un sistem GPS obișnuit.

Cunoscând distanța la țintă, se pot calcula coordonatele de poziție în sistemul inertial ale descărcării Corona folosind următoarea ecuație:

$$p_{st}^i = \begin{bmatrix} p_n \\ p_e \\ p_d \end{bmatrix} + (h_{UAV} - h_{st}) \frac{R_{\Psi\Theta\Phi} R_g^g R_g^c l'}{k_i * R_{\Psi\Theta\Phi} R_g^g R_g^c l_c} \quad (5.4.44)$$

Prin determinarea coordonatelor țintei de interes, și anume descărcarea Corona, se deschid noi teme de cercetare în ceea ce privește realizarea unei hărți cu zonele în care a fost detectată descărcarea Corona, astfel facilitând intervenția echipelor de mentenanță în vederea remedierii defectelor care provoacă acest fenomen.

V.5. Blocul de urmărire a țintei

Urmărirea descărcării Corona de către senzorul optic, în momentul în care este descoperită, reprezintă o fază esențială în procesul de analiză a semnalului video. Clasificarea descărcării Corona se realizează în funcție de numărul de pixeli relevanți (pixeli albi) din imagine ceea ce necesită o urmărire stabilă și permanentă a acestui fenomen.

Așa cum rezultă din schema bloc a software-ului CDC (fig. 5.2), blocul de urmărire al țintei procesează semnalul video recepționat de la Camera Corona sau de la orice altă sursă video de la bordul UAV-ului. Acest bloc, pe baza semnalului recepționat, calculează deviațiile unghiurilor de atitudine ale gimbalului (sistemul de stabilizare al camerei), astfel încât coordonatele pixelilor țintei selectate să se suprapună cu coordonatele centrului imaginii, astfel încât, indiferent de evoluția UAVului, ținta să nu dispară din cadrul video, chir mai mult, să rămână întotdeauna în centrul imaginii.

V.5.1. Calculul corecțiilor unghiurilor gimbalului

Sistemele UAV de dimensiuni mici sunt folosite, cum este cazul UAV-ului proiectat, cel mai frecvent, pentru îndeplinirea misiunilor de tip ISR (Intelligence Surveillance Reconnaissance). Dacă UAV-ul este echipat cu sistem de stabilizare al camerei (gimbal), acest lucru implică control asupra camerei astfel încât să se focalizeze asupra țintelor.

Gimbalul folosit pentru zbor deasupra LEA este proiectat pe 2 axe (azimut și elevație), acest lucru însemnând că ecuațiile de mișcare pentru ansamblul gimbal sunt:

$$\dot{\alpha}_{az} = \Delta \alpha_{az} \quad (5.5.45)$$

$$\dot{\alpha}_{el} = \Delta \alpha_{el} \quad (5.5.46)$$

Unde : $\Delta \alpha_{az}$ și $\Delta \alpha_{el}$ sunt variabilele de control ale unghiurilor de azimut și, respectiv, elevație ale gimbal-ului.

Următoarea etapă este determinarea unghiurilor de azimut și de elevație luând în considerare faptul că, într-un cadru video extras din fluxul video, axa optică este dată de vectorul $(0,0,1)^c$. Astfel că, în urma procesării semnalului video și aplicarea algoritmilor de urmărire se generează unghiurilor de azimut și elevație comandate $(\alpha_{az}^c, \alpha_{el}^c)$.

Rezultă:

$$\begin{aligned} \tilde{l}_d^{UAV} &= \begin{pmatrix} \tilde{l}_{xd}^{UAV} \\ \tilde{l}_{yd}^{UAV} \\ \tilde{l}_{zd}^{UAV} \end{pmatrix} = R_g^{UAV}(\alpha_{az}^c, \alpha_{el}^c) * R_c^g \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \cos \alpha_{el}^c \cos \alpha_{az}^c & -\sin \alpha_{el}^c & -\sin \alpha_{el}^c \cos \alpha_{az}^c \\ \cos \alpha_{el}^c \sin \alpha_{az}^c & \cos \alpha_{az}^c & -\sin \alpha_{el}^c \sin \alpha_{az}^c \\ \sin \alpha_{el}^c & 0 & \cos \alpha_{el}^c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{el}^c \cos \alpha_{az}^c \\ \cos \alpha_{el}^c \sin \alpha_{az}^c \\ \sin \alpha_{el}^c \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5.5.51)$$

Prin determinarea unghiurilor de azimut și elevație comandate α_{az}^c și α_{el}^c se pot determina unghiurile de azimut și elevație dorite:

$$\alpha_{az}^c = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\tilde{l}_{yd}^{UAV}}{\tilde{l}_{xd}^{UAV}} \right) \quad (5.5.52)$$

$$\alpha_{el}^c = \sin^{-1} \left(\tilde{l}_{zd}^{UAV} \right) \quad (5.5.53)$$

În concluzie, comenzile de corecție ale servomecanismelor care acționează gimbal-ul pot fi definite astfel:

$$\begin{aligned} \Delta \alpha_{az} &= k_{az} (\alpha_{az}^c - \alpha_{az}) \\ \Delta \alpha_{el} &= k_{el} (\alpha_{el}^c - \alpha_{el}) \end{aligned} \quad (5.5.54)$$

Unde k_{az} și k_{el} sunt valorile câștigului sistemului de control de tip PD al gimbalului.

Deviațiile față de centrul imaginii determinate la de ecuațiile (5.5.54) sunt transmise platformei girostabilizate, în vederea compensării erorilor de urmărire a țintei.

În momentul implementării calcului matematic referitor la determinarea comenzilor de corecție, atunci operatorul de la sol al UAV-ului, este capabil să comande oprirea transmisiei video de la monitorul stației de control, încadrând, în cadrul video afișat, ținta ce prezintă interes (stalpul sau izolatorul unde a fost identificata descărcarea Corona).

Selectarea țintei de interes poate fi realizată prin intermediul unor puncte sau a unei forme geometrice de tip pătrat, dreptunghi, cerc sau elipsă, fig. 5.12.



Fig.5.11. Cadrul selectat în momentul opririi transmisiei video

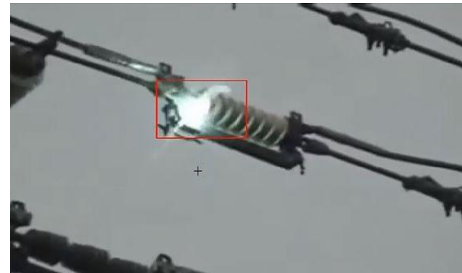


Fig.5.12. Urmărirea țintei de interes

Deoarece algoritmul de urmărire realizat folosește doar nuanța din spațiul de culoare HSV (Hue Saturation Value) și ignoră pixelii cu luminozitate ridicată sau scăzută, sistemul oferă o toleranță ridicată la iluminare. Atât timp cât ocluzia țintei nu este 100%, va fi urmărit ce a rămas din distribuția probabilităților țintei. Fereastra de căutare își va modifica dimensiunile în funcție de dimensiunile țintei, gestionând automat neregularitățile induse de mișcarea acesteia.

V.6. Blocul de clasificare

Blocul de clasificare conține clasele și metodele necesare pentru a face o predicție bazată pe mai multe date decât pur și simplu numărul de pixeli albi rămași într-o imagine binară. Pentru clasificarea imaginilor binare, au fost alese, pentru a fi puse în aplicare, o serie de metode, cele mai cunoscute din domeniu, astfel încât să se creeze o bază de comparație cu scopul continuării studiului. Pentru o clasificare cât mai eficientă s-a decis analiza mai multor algoritmi specifici învățării automate.

V.6.1. Descrierea algoritmilor de învățare automată supuși analizei

Pentru o imagine de ansamblu a tipurilor de algoritmi existenți și alegerea celui mai potrivit pentru clasificarea descărcării Corona, în această secțiune a fost realizat un studiu cu privire la caracteristicile de procesare și modelul matematic din spatele mai multor algoritmi de învățare automată.

În continuare, sunt prezentați mai mulți algoritmi de învățare supervizată, pe baza cărora se vor procesa, ulterior, seturile de date obținute.

V.6.1.1. Algoritm de clasificare SVM (Support Vector Machine)

Din punct de vedere matematic, un algoritm de învățare automată supervizată care folosește SVM, poate fi descris prin ecuația hiperplanului astfel:

$$f(x) = \alpha x' + b = 0 \quad (5.5.55)$$

Unde, α și b sunt numere reale, iar setarea acestor numere astfel încât $\|\alpha\|$ să fie minimă pentru toate punctele de date (x_i, y_i) , unde $y_i f(x_i) \geq 1$.

Pentru acei vectori, x_i , care se află la marginea planului de separație, $y_i f(x_i) = 1$.

Este necesar să se cunoască faptul că seturile de date sunt de fapt seturi de puncte (vectori), x_i , asociați categoriilor, y_i , pentru diferite dimensiuni, d , unde $x_i \in R^d$ și $y_i = \pm 1$.

Așadar, soluția optimă pentru problema pătratică de programare este dată de perechea $(\hat{\alpha}, \hat{b})$, care clasifică vectorul z conform ecuației:

$$clasă(z) = \text{sign}(z' \hat{\alpha} + \hat{b}) = \text{sign}(\hat{f}(z)) \quad (5.5.56)$$

Unde, $\hat{f}(z)$ reprezintă scorul de clasificare, iar z este distanța dintre hiperplanul de separare și margine.

Pentru a măări dimensiunea distanței de la hiperplan la marginea de separație, se folosește funcția kernel.

V.6.1.2. Algoritm de clasificare liniar

Determinarea parametrilor standard pentru un algoritm de clasificare liniar implică rezolvarea unei probleme de optimizare, definită astfel [156]:

$$\min(w) \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^l \xi(w; y_i, x_i) \quad (5.5.57)$$

Unde C este parametrul de regularizare și $\xi(w; y_i, x_i)$ este funcția de pierderi care este definită astfel :

$$\xi(w; y_i, x_i) = \begin{cases} \max(0, 1 - yw^T x) \\ \max(0, 1 - yw^T x)^2 \\ \log(1 + e^{-yw^T x}) \end{cases} \quad (5.5.57)$$

În ecuația (5.5.57), prima ramură a funcției de pierderi se numește funcție de pierderi de gradul 1, a doua ramură se numește funcție de pierderi de gradul 2, iar cea de-a treia ramura este funcția de pierderi logaritmică.

V.6.1.3. Algoritm de clasificare cu kernel liniar

Principala diferență dintre un algoritm de clasificare liniar și un algoritm de clasificare cu kernel liniar este dată de faptul că fiecare vector x este mapat ca $\phi(x)$ într-un spațiu dimensional diferit. De exemplu, funcție de pierderi de gradul 1 din ecuația (5.5.57), devine:

$$\max(0, 1 - y_i(w^T \phi(x_i) + b)) \quad (5.5.58)$$

Unde b este termenul de bias.

De obicei, $\phi(x)$ are o dimensiune foarte mare, iar din acest motiv se aplică metode de calcul bazate pe spațiul caracteristicilor (*KT – Kernel Tricks*) [158]. Astfel că, w , devine o combinație liniară de $\phi(x_i)$, $\forall i$:

$$w = \sum_{i=1}^l y_i \alpha_i \phi(x_i) \quad (5.5.59)$$

Unde α_i , $\forall i$ sunt soluțiile problemei de optimizare următoare:

$$\min_{\alpha} \frac{1}{2} \alpha^T Q \alpha - e^T \alpha, \quad 0 \leq \alpha_i \leq C, \forall i, \quad y^T \alpha = 0 \quad (5.5.59)$$

Unde $Q_{ij} = y_i y_j K(x_i, x_j)$, $K(x_i, x_j)$ fiind o funcție kernel, în timp ce e este vectorul cu valori de 1.

Pentru celelalte 2 funcții ale ecuației (5.5.57), funcția de pierderi de gradul 2 și funcția de pierderi logaritmică, problema de optimizare este prezentată în referințele [159] și [160].

De asemenea, sunt folosiți des și algoritmi de clasificare cu kernel polinomial și cu kernel Gaussian, numit și funcție cu bază radială (*RBF – Radial Base Function*).

V.6.1.4. Algoritm de clasificare cu kernel polinomial

În analiza efectuată de determinarea a celui mai bun algoritm de clasificare potrivit pentru determinarea descărcării Corona, s-a studiat algoritmul de clasificare cu kernel polinomial. Astfel că, din punct de vedere matematic, acesta poate fi definit astfel:

$$K(x_i, x_j) = (\gamma x_i^T x_j + r)^d \quad (5.5.60)$$

Unde γ și $r > 0$, iar d este parametrul care dă gradul polinomului, acesta fiind stabilit de operator.

V.6.1.5. Kernel cu funcție cu baza radială (RBF – Radial Base Function)

Pentru a folosi un algoritm de clasificare de tip Gaussian sau funcție cu baza radială, se ia în considerare o dimensiune infinită. Într-un astfel de spațiu, setul de date trebuie să fie, în mod necesar, separabil. Acest lucru implică o complexitate și un timp de calcul mai mare, dar în acest fel separarea datelor este asigurată, iar categoriile de date sunt determinate cu mai multă precizie.

Kernelul cu funcție cu baza radială este unul dintre cele mai cunoscute și utilizate kerneluri, fiind descris de următoarea ecuație:

$$K(x_i, x_j) = e^{-\gamma \|x_i - x_j\|^2} \quad (5.5.61)$$

Unul dintre cele mai cunoscute ghiduri de aplicare a algoritmilor de clasificare SVM sugerează parcurgerea următorilor pași în vederea antrenării unui algoritm de clasificare cu kernel liniar: 1. Etichetarea fiecărei caracteristici, a cadrelor video folosite pentru antrenare, pe intervalul [-1,+1]; 2. Folosirea unui kernel Gaussian și selectarea parametrilor C și γ , care dau cele mai precise rezultate la metoda de validare încrucișată (CV); 3. Obținerea modelului w pe baza parametrilor C și γ .

V.6.1.6. Algoritm de clasificare cu kernel cu regresie logistică

Ipotezele pot simplifica mult procesul de învățare, dar pot limita și ceea ce se poate învăța. Algoritmii care simplifică funcția într-o formă cunoscută se numesc algoritmi parametrici de învățare automată. Unul dintre algoritmii de clasificare bazat pe algoritmi parametrici este algoritmul de clasificare cu kernel cu regresie logistică. Un astfel de algoritm poate fi exprimat din punct de vedere matematic după următoarea ecuație [161]:

$$P(Y = 1 | x, w) = \frac{1}{1 + e^{-(w \cdot \phi(x) + b)}} \quad (5.5.61)$$

În continuare, se definesc funcțiile pondere, w , ca vectori suport astfel:

$$P(Y = 1 | x, w) = \frac{1}{1 + e^{-\sum_i \alpha_i \phi(x_i) \phi(x) + b}} \quad (5.5.62)$$

Ajungând în final să fie scrisă astfel:

$$P(Y = 1 | x, w) = \frac{1}{1 + e^{-\sum_i \alpha_i K(x, x_i) + b}} \quad (5.5.63)$$

Ecuația (5.5.63) reprezintă suportul matematic din spatele unui algoritm de clasificare cu kernel cu regresie logistică.

V.6.1.7. Algoritm de clasificare kNN (k – Nearest Neighbor)

Setul de algoritmi pentru clasificarea prin metoda kNN se bazează pe ideea centrală că cele mai apropiate puncte de date (vecini) dintr-o anumită clasă pot alege clasa exemplului pe care se face clasificarea. De exemplu, dacă se analizează un set de 5 cadre video, iar 3 dintre ele sunt clasificate ca imagini în care apare descărcarea Corona, iar 2 nu prezintă nimic, atunci înseamnă că grupul din care fac parte va fi clasificat ca o metadată în care apare descărcarea Coroana.

V.6.1.8. Algoritm de clasificare RadiusNN (Radius Nearest Neighbor)

Principiul care se află în spatele metodelor bazate pe cel mai apropiat vecin, este acela de a găsi un număr predefinit de mostre de antrenare care se află cel mai aproape de noul punct analizat și de a prezice etichetarea acestuia. Numărul de eșantioane poate fi o constantă definită de utilizator (k – cei mai apropiați vecini) sau variază în funcție de densitatea locală de puncte (cel mai apropiat vecin în funcție de rază - RadiusNN). Distanța poate fi, în general, orice măsura metrică, astfel că distanța standard, Euclideană, este cea mai comună alegere.

În ciuda simplității sale, acest algoritm de clasificare s-a bucurat de succes într-un număr mare de probleme de clasificare și regresie, inclusiv cifre scrise de mână sau scene de imagine prin satelit. Fiind o metodă neparametrică, este adesea folosită cu succes în situațiile de clasificare în care planul de separare este foarte neregulat.

V.7. Blocul de stocare și afișare a rezultatelor

În cele din urmă, blocul de stocare și afișare a rezultatelor este ceea ce se poate numi interfața om-mașină și locul unde se analizează toate datele măsurate și unde sunt transformate în rezultate semnificative. Propunerea pentru acest modul este aceea a unei interfețe grafice (GUI) în care fluxul video este redat ecran, iar pe același ecran sunt atașate metadatele extrase în urma procesării și a clasificării cadrelor analizate. Operatorul poate lua în considerare acest lucru în stabilirea deciziilor cu privire la continuarea misiunii de zbor.

VI. REZULTATE EXPERIMENTALE FINALE

În acest capitol sunt prezentate rezultatele obținute după analiza algoritmilor de învățare automată supervizată și modul de răspuns al acestora în vederea identificării de descărcare Corona din pachetul de date de test folosit.

Pentru analiza performanțelor acestor algoritmi, metricile folosite sunt timpul de execuție și scorul obținut. Evaluarea s-a realizat folosind metoda de validare încrucișată CV (Cross Validation).

VI.1. Moduri de validare a rezultatelor

Interpretarea rezultatelor reprezintă una dintre cele mai importante activități în identificarea de descărcare Corona, validând astfel munca depusă în dezvoltarea software-ului CDC proiectat. Pentru a avea certitudinea că rezultatele sunt verosimile și corespund cerințelor propuse de la început, s-a apelat la două metode de evaluare.

În continuare, este prezentat modul de interpretare a rezultatelor bazat pe metoda validării încrucișate.

Pentru a nu reduce cantitatea finală de date prin împărțirea în mai multe seturi, s-a folosit metoda validării încrucișate (CV – Cross Validation) cu ajutorul căreia s-a renunțat la setul de date de test, împărțind setul de date doar în date de antrenare și date de validare.

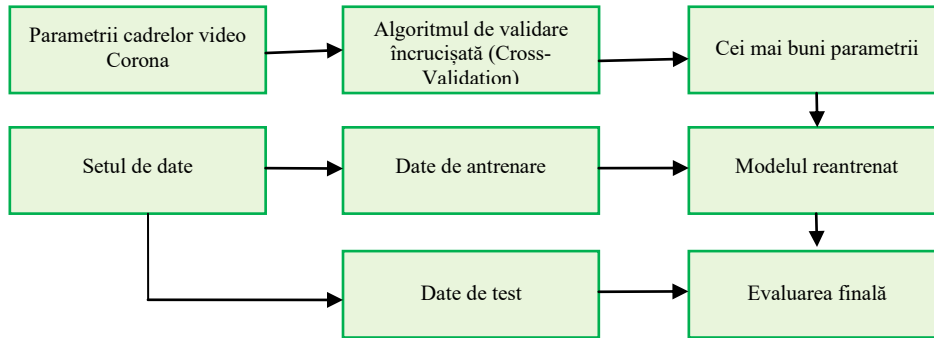


Fig. 6.1. Diagrama de lucru a algoritmului de validare încrucișată folosit

Metoda validării încrucișate presupune 2 variante de abordare posibile: (1) validare încrucișată cu împărțirea în miniseturi de date (*K-fold*) și validare încrucișată cu împărțire aleatorie a seturilor de date (*ShuffleSplit*).

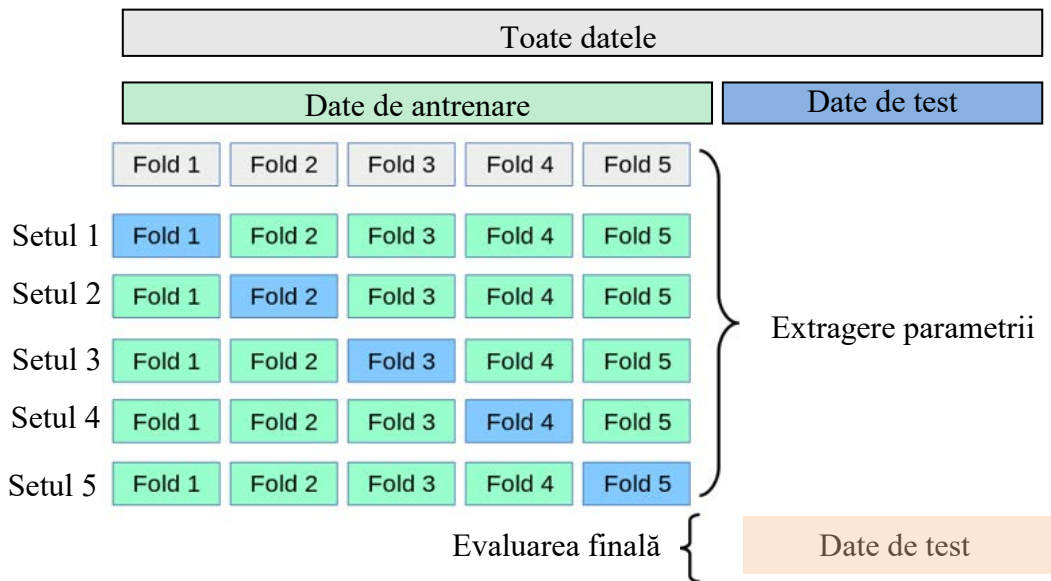


Fig. 6.2. Diagrama de funcționare a metodei de validare K-fold [162]

În abordarea de bază, numită validare încrucișată *K-fold*, setul de antrenament este împărțit în k seturi (fold) mai mici, așa cum este prezentat în figura 6.2.

În figura 6.3. este prezentat comportamentul asupra datelor a metodei de validare încrucișată *K-fold*, cu precizarea că această metodă nu este influențată de clase sau de grupuri de date.

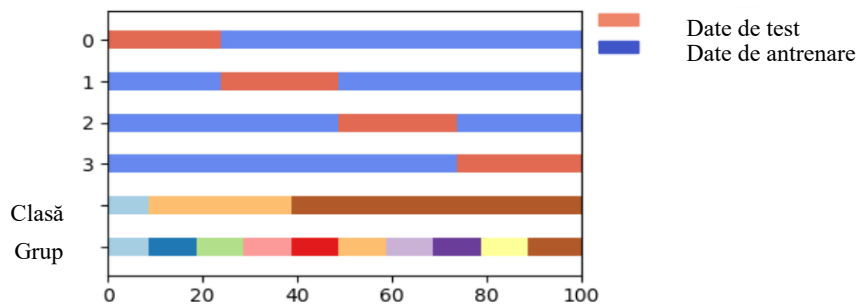


Fig. 6.3. Metoda de validare K-fold [162]

Metoda de validare încrucișată cu împărțire aleatorie a seturilor de date (*ShuffleSplit*), se bazează pe permutări aleatorii ale seturilor de date care în acest caz sunt împărțite în seturi și mai mici față de metoda K-fold. Astfel că, iteratorul acestei metode de validare, generează un număr definit de utilizator de instanțe independente de antrenare, respectiv de test.

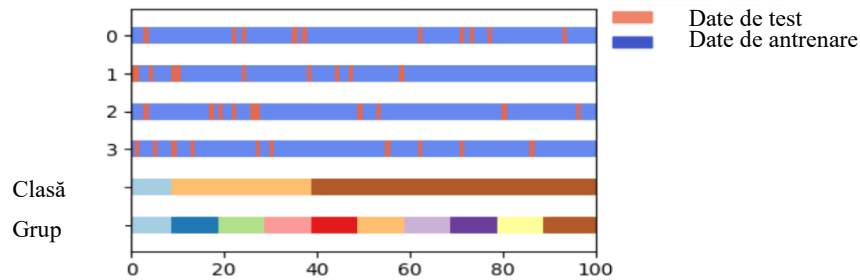


Fig. 6.4. Metoda de validare ShuffleSplit [162]

Metoda de validare încrucișată cu împărțire aleatorie a seturilor de date (*ShuffleSplit*) reprezintă o alternativă bună la validare încrucișată cu împărțirea în miniseturi de date (*K-fold*), de aceea, în analiza algoritmilor de clasificare a descărcării Corona au fost folosite ambele metode. Astfel se poate afirma că rezultatele obținute au dublă validare.

VI.2. Descrierea seturilor de date folosite

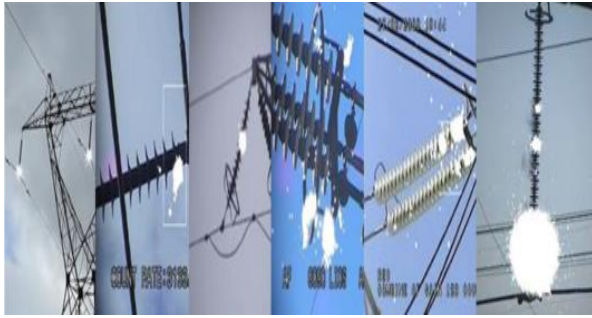
Pregătirea datelor video pentru procesul de clasificare a reprezentat o provocare și în același timp o satisfacție întrucât s-a reușit achiziția a 4 seturi de date diferite, fiecare set reprezentând câte o sursă de descărcare Corona.

Primul set de date este reprezentat de un colaj, procesat și redimensionat, format din diferite surse video, fără restricții de drept de proprietate intelectuală (*eng: open source*), în care apare descărcarea Corona. Ajungând la concluzia că este nevoie de mai multe date de antrenare pentru ca algoritmul de clasificare să fie cât mai precis, al doilea set de date a fost obținut în laborator, prin achiziția de cadre video de la un generator de Corona, setat la diferite intensități. Al treilea set de date a fost obținut prin înlocuirea arcului electric produs de descărcarea Corona cu un arc electric produs de sudură. formandu-se pixeli cu intensitatea luminoasă peste valoarea de prag de 250. Acest lucru a făcut ca setul de date numărul 3 să nu fie atât de eficient precum am crezut.

Pentru testarea algoritmului de detectare și clasificare a descărcării Corona, ca set de date de test, au fost folosite filmulețele înregistrate în urma zborului de verificare a sistemului UAV proiectat, chiar deasupra liniei de înaltă tensiune de 400 kV, Brașov-Gutinaș.

În fig. 6.5 sunt prezentate cele patru seturi de date folosite pentru antrenarea și testarea algoritmilor de clasificare a descărcării Corona.

Pentru uniformitatea datelor de intrare și ținând cont de rezoluțiile imaginilor folosite ca date de ieșire de unele dintre cele mai cunoscute camere Corona, toate seturile de date au fost convertite la rezoluția de 320x240 de pixeli. Acest lucru, pe lângă decizia de a transforma imaginile în format grayscale, a dus la creșterea vitezei de calcul și implicit la creșterea scorurilor care caracterizează precizia algoritmilor de clasificare.



a) Colaj cu filmulețe open source (Set date 1)



b) Descărcarea Corona generată în laborator (Set date 2)



c) Descărcarea Corona simulată prin arc electric - sudură (Set date 3)



d) Procesarea înregistrărilor unui zbor pe liniile de înaltă tensiune (Set date 4)

Fig. 6.5. Descrierea seturilor de date folosite pentru antrenarea și testarea algoritmilor de clasificare

VI.3. Rezultate experimentale obținute

Pentru demonstrarea alegerii celui mai bun algoritm de învățare automată supervizată, în urma comparării unui număr de 8 algoritmi, analiza acestora s-a desfășurat pe parcursul unui număr de 4 experimente abordate etapizat.

În prima fază s-a efectuat achiziția, analiza critică și transformarea primului set de date, dintr-un număr de filmulețe *open source* într-un colaj video care poate fi folosit pentru îmbunătățirea algoritmului dezvoltat. Acest prim set de date a fost folosit, în principal, la justificarea funcționalității modului de preprocesare, demonstrând că alegerea procedurii de filtrare a cadrelor video cu un filtru median, a fost o alegere inspirată.

VI.3.1. Experimentul I – Demonstrarea utilității modului de preprocesare

Plecând de la formularea problemei, și anume, că șablonul manifestării descărcării Corona este unul imprevizibil și greu modelabil ca reprezentare într-o imagine, în primul experiment se urmărește alegerea metodelor optime de preprocesare a cadrelor video recepționate de la senzorul UV dispus la bordul UAV-ului, în așa fel încât caracteristicile selectate să fie reprezentative pentru problema de clasificare.

Pentru un experiment cât mai variat, în fiecare instanță a setului de date folosit, înainte de împărțirea în "date de antrenare", respectiv "date de testare", s-a efectuat o combinație aleatorie a probelor.

Cele 2 grafice comparative de mai jos, au fost produse în vederea demonstrării diferenței semnificative între cele două niveluri de filtrare a imaginii de intrare în ceea ce

privește scorurile obținute. În acest scenariu ales, se poate observa cum rezultatele cresc semnificativ, în cazul tuturor algoritmilor analizați scorul crește, iar din punct de vedere al acurateții datelor, algoritmi SVC cu kernel RBF, KNN și radius KNN prezintă, de asemenea o creștere importantă.

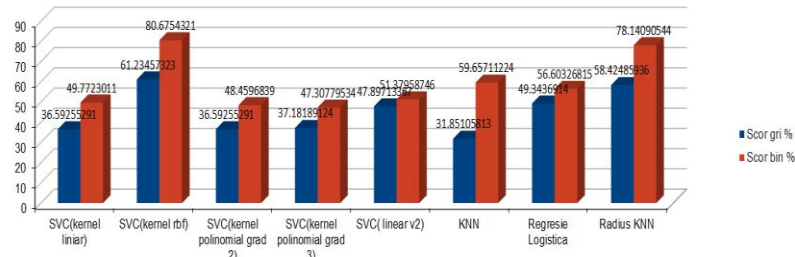


Fig. 6.8. Scor comparativ set date tonuri de gri vs set date binare

În figura 6.8 se observă o creștere a scorului datelor binare cu 19,44% față de datele grayscale, în cazul algoritmului SVC cu kernel RBF, în cazul algoritmului Radius KNN, procentul de creștere este 19,72%, iar în cazul algoritmului, KNN, creșterea este și mai mare, ajungând la un procent de 27,80%.

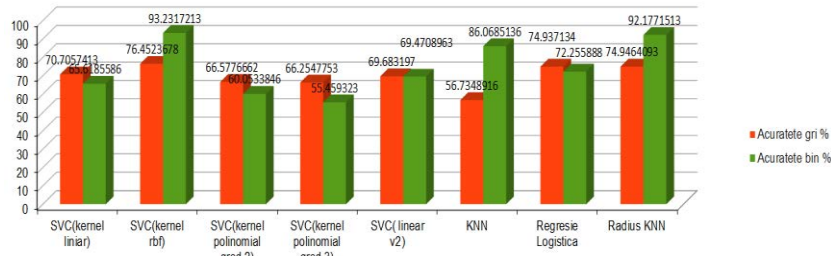


Fig. 6.9. Acuratețe comparativă set date grayscale vs set date binare

În cazul acurateții algoritmilor asupra seturilor de date analizate, se poate observa în figura 6.9, că algoritmi care au răspuns cel mai bine la analiza scorului comparativ dintre setul de date în tonuri de gri și setul de date binar, au avut, de asemenea, o acuratețe superioară. În cazul algoritmilor SVC cu kernel RBF creșterea a fost de 16,78%, iar în cazul algoritmului Radius KNN, creșterea a fost de 17,92%, în timp ce pentru algoritmul de clasificare KNN, creșterea a fost și mai mare, ajungând până la 29,33%.

În concluzie, se poate observa că după aplicarea metodei de prag și segmentarea imaginilor, rezultând imagini binare, atât scorul cât și acuratețea algoritmilor de clasificare cresc de la 10% până la 30%.

VI.3.2. Experimentul II - Testarea empirică a algoritmilor posibili

Pentru experimentul numărul II, la setul de date numărul 1, se adaugă încă un set de date (setul de date numărul 2), obținut experimental în laborator și format dintr-un număr de aproximativ 1000 de cadre video reprezentând imagini înregistrate de camera Corona PCO Ultraviolet asupra unei instalații de generare a descărcării Corona.

De asemenea, metoda de experiment propusă are la bază metoda validării încrucișate prin verificarea cu cele două abordări de împărțire a datelor, prezentate în secțiunea VI.1, și anume, metoda de validare încrucișată *K-fold* (suma totală a datelor este împărțită în 5 seturi) și metoda de validare încrucișată *ShuffleSplit* (suma totală a datelor este împărțită în n seturi

aleatorii). Pentru evitarea suprapotrivirii (*Overfitting*), setul de date total a fost împărțit în date de antrenare (70%) și date de validate (30%).

În figura 6.11 este prezentată evoluția comparativă a timpilor de antrenare și a timpilor de testare pentru fiecare algoritm în parte. Așadar, se observă că, de exemplu, pentru unul din algoritmi de clasificare analizați care au prezentat performanțe bune în verificările anterioare, și anume algoritmul RadiusNN, timpul de testare este puțin mai mare față de timpul celorlalți algoritmi. Acest lucru se explică prin nevoia de învățare a unei probe noi, care este diferită față de probele deja introduse în modelare.

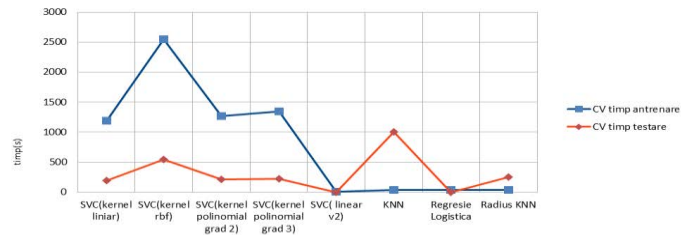


Fig. 6.11. Reprezentarea timpilor de antrenare și testarea a algoritmilor analizați

Prin analiza rezultatelor experimentului II, se poate concluziona că introducerea de seturi de date noi îmbunătățește considerabil rezultatele obținute. Acest aspect a stat la baza achiziției setului de date numărul 3, descărcarea Corona simulată printr-un arc electric de sudură.

În următorul grafic este prezentată o analiză comparativă a evoluției scorului algoritmilor de clasificare supuși analizei pentru cele 3 variante rulate în experimente: (1) imagini în tonuri de gri (*grayscale*), (2) imagini binare (metoda pragului) și (3) extinderea setului de date. Pentru uniformitate, toate rezultatele sunt prezentate folosind ca metrică, scorul, metrica de acuratețe fiind exclusă.

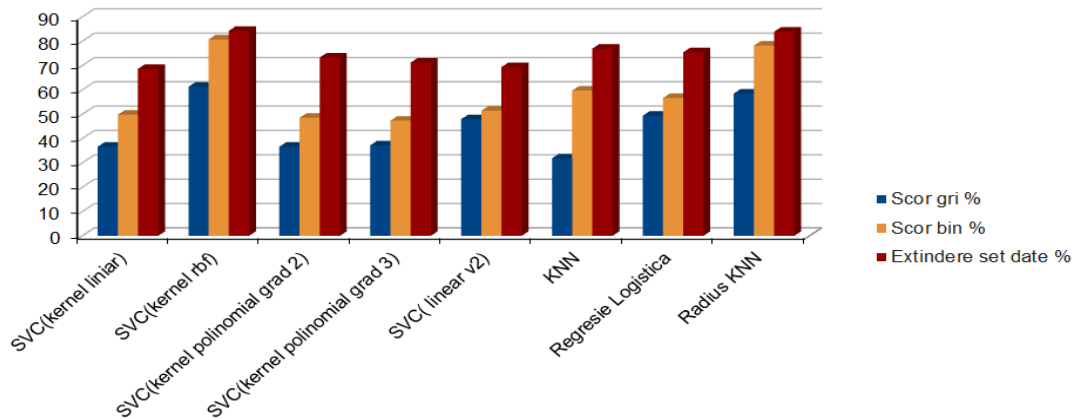


Fig. 6.13. Rezultate în urma antrenării algoritmilor cu setul de date 2

Figura 6.13 este cea mai elocventă pentru experimentul II, întrucât se observă o creștere a scorurilor tuturor algoritmilor. De asemenea, se observă o creștere treptată a fiecărui algoritm, de exemplu, SVC cu kernel liniar are un procent al scorului de 36,59% după antrenarea cu un set de imagini în tonuri de gri (*grayscale*), după antrenarea cu un set de imagini binare procentul crește la 49,77%, adică cu 13,18%, iar în momentul utilizării celui de-al doilea set de date scorul crește cu 31,98% față de scorul de antrenare cu imagini *grayscale*.

VI.3.3. Experimentul III – Optimizarea algoritmilor aleși

În cazul experimentului III pentru procesare de imagini Corona, s-a efectuat optimizarea parametrilor de bază ai algoritmilor de clasificare analizați, folosind metoda GridSearchCV, specifică pachetului software de Python Scikit. Cu această metodă se pot verifica o serie de valori pentru parametrii standard, precum, C, gamma (γ) și numărul de vecini, returnând cel mai bun estimator parametrizat în urma rulării de 5 ori a bazei de date pusă la dispoziție.

Rezultatele rulării noilor parametri aleși prin metoda GridSearchCV sunt prezentate în figura 6.14, având ca metrici de validare: (1) scorul mediu pentru împărțirea setului de date complet în 5 subseturi (fold-uri), (2) scorul de validare în urma alegerii parametrilor și (3) scorul de testare pe un set de date la prima vedere. Toate metricile de scor sunt reprezentate în procente.

Pentru exemplificarea mai concretă a rezultatelor au fost aleși cei mai buni 3 algoritmi de clasificare, 2 care au avut rezultate constant bune de-a lungul experimentelor anterioare, anume SVC cu kernel RBF și Radius NN și un al treilea algoritm cu rezultate inițial slabe, SVC cu kernel liniar. Scopul alegerii celui de-al treilea algoritm mai slab este de a urmări măsura în care alegerea optimă a unor parametrii poate duce la rezultate net superioare. Se poate observa în cele ce urmează că, deși inițial a prezentat rezultate slabe, pe parcursul experimentelor performanța a crescut considerabil, ajungând la un procent al scorului de 82,84% în urma optimizărilor.

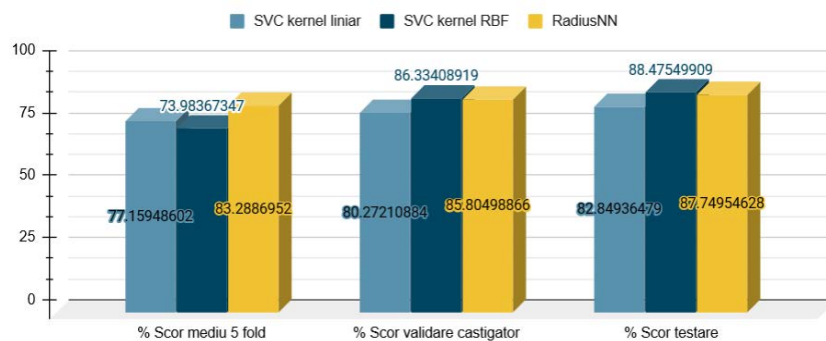


Fig. 6.14. Reprezentarea grafică a scorurilor algoritmilor aleși

În figura 6.14 sunt prezentate noile scoruri obținute în urma optimizării cu metoda GridSearchCV. O primă observație se îndreaptă către algoritmul SVC kernel liniar care cunoaște creșteri spectaculoase în rezultatele obținute. Astfel, în baza metodei de validare încrucișată K-Fold cu 5 straturi obține un scor mediu de 77,16%, scorul câștigător dintre cele 5 iterații fiind de 80,27%. Urmând același tip de progresie precum ceilalți algoritmi din experimentul III, rezultatele de test pe 20% din datele rămase cresc până la 82,84%. Același lucru s-a întâmplat și cu ceilalți 2 algoritmi aleși, având o creștere procentuală cu 19,58%, în cazul algoritmului SVC cu kernel RBF, iar în cazul algoritmului RadiusNN, creșterea a fost cu doar 2,26%. Această creștere relativ mică pentru RadiusNN poate sugera faptul că modelul este deja la un nivel de saturație ce nu mai este sensibil la încercări de optimizare.

Un al doilea criteriu de departajare a algoritmilor aleși este reprezentat de timpul necesar procesului de evaluare, respectiv procesului de validare. Astfel, în figura 6.18 se observă că Radius NN are cel mai bun timp de antrenare, de aproximativ 114 minute, însă

timpul de validare este foarte mare, ajungând la 2035 min (aproximativ 34 ore). Interesant este faptul că, cel mai mare timp de antrenare îl are algoritmul SVC cu kernel RBF, ajungând la 3575 minute (aproximativ 59 ore). Acest lucru de întâmplă din cauza modelului matematic mai complex pe care algoritmul SVC cu kernel RBF îl are.

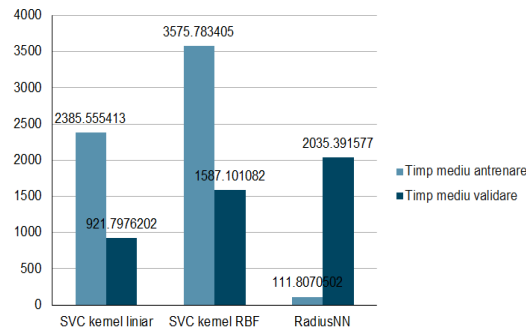


Fig. 6.18. Timp mediu de antrenare vs timp mediu de validare

În figura 6.19 este prezentată evoluția algoritmilor analizați pe parcursul celor 3 experimente. Astfel că, în toate cazurile se observă o creștere a scorurilor, cea mai spectaculoasă fiind în cazul algoritmului SVC cu kernel liniar, totuși cele mai bune performanțe, pe parcursul celor 3 experimente, le are algoritmul SVC cu kernel RBF.

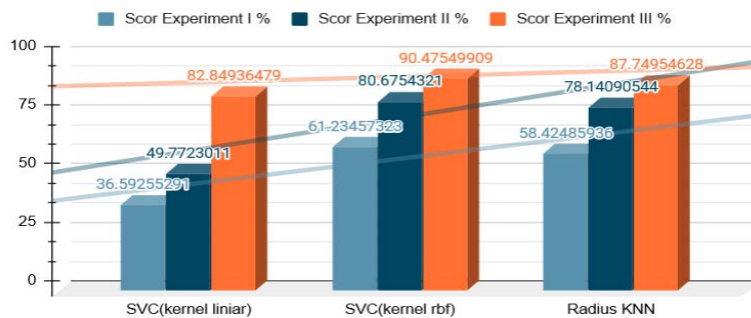


Fig. 6.19. Evoluția scorurilor algoritmilor analizați pe parcursul celor 3 experimente

În urma optimizării, se poate observa o creștere semnificativă, în raport cu rezultatele experimentului II, în cazul algoritmului SVC cu kernel liniar, creșterea ajunge până la 14,27%. Algoritmii SVC cu kernel RBF și Radius KNN, prezintă, de asemenea, creșteri, dar nu atât de importante.

VI.3.4. Experimentul IV - Validarea algoritmilor aleși cu un flux de cadre video nou introdus

În mod normal, pentru a verifica modul de detectare a descărcării Corona dintr-un set nou de date, trebuie ales algoritmul care s-a comportat cel mai bine în experimentele anterioare. O prima decizie ar fi alegerea algoritmului SVC cu kernel RBF, dar având în vedere că rezultatele obținute sunt foarte asemănătoare cu ale algoritmului Radius NN și că algoritmul SVC cu kernel linear a avut o creștere spectaculoasă după aplicarea metodei de optimizare GridSearchCV. Experimentul IV propune testarea tuturor algoritmilor optimizați anterior pe un set de date set de date complet nou.

Testarea s-a realizat pe setul de date achiziționate prin survolarea spațiului aerian cu un dispozitiv UAV asupra cărora a fost adăugat artificial un efect asemănător descărcării Corona. S-au realizat 2 teste, anume pe o fracțiune de 100 de imagini și pe un grup de 1000 de imagini.

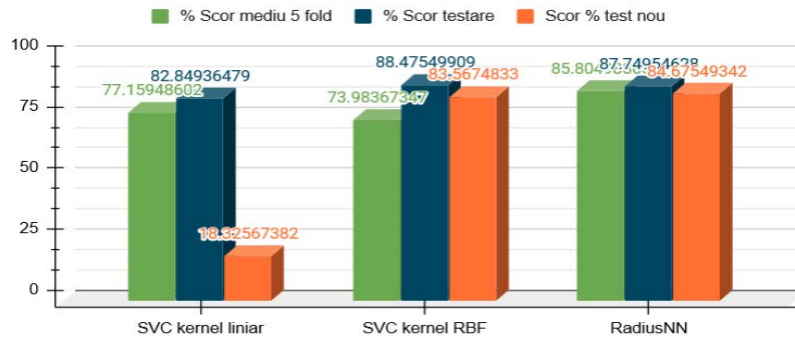


Fig. 6.20. Scorul algoritmilor analizați la o fracțiune de 100 de cadre noi

În figura 6.20, se pot observa rezultatele obținute. O primă observație este asupra scăderii spectaculoase a rezultatelor pentru SVC cu kernel liniar la doar 18,32% precizie deși în urma optimizării trecuse de pragul de 80%. Această observație se traduce ca fiind o dificultate majoră de adaptare a estimatorului la un set de date la prima vedere în ciuda încercărilor de optimizare. O altă concluzie este că în urma procedurii de optimizare am ajuns într-un punct de „overfitting”; modelul a devenit atât de specializat pe caracteristicile setului de date primit ca intrare încât în momentul în care a fost introdus unul nou nu a avut capacitatea sa prezică în mod corect. Am demonstrat astfel ipoteza legată de hiper-optimizare.

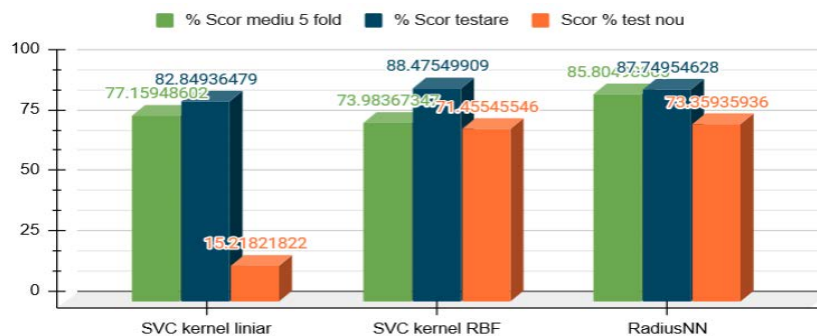


Fig. 6.21. Scorul algoritmilor analizați la un set de date de 1000 de cadre noi

Pentru algoritmi selectați câștigători în toate rundele de experiment se observă comparativ o stabilitate și o evoluție mult mai bună, atât la testare cu o fracțiune de 100 de cadre noi, cât și la testarea cu un set de date de 1000 de cadre noi. Deși rezultatele sunt mai scăzute decât în ultima etapă de test, acest lucru era de așteptat lucrând cu un set de date complet nou. Scăderea este totuși în parametri ce permit încă utilizarea lor într-un scenariu real. Stabilitatea modelelor de ecuații din spatele predictorului propun SVC cu kernel RBF și RadiusNN ca variante plauzibile pentru un sistem de clasificare în timp real al descărcării Corona.

În figurile 6.22 și 6.23 sunt prezentați timpii necesari de testare pentru un set de date de 100 de cadre, respectiv pentru un set de date de 1000 de cadre.

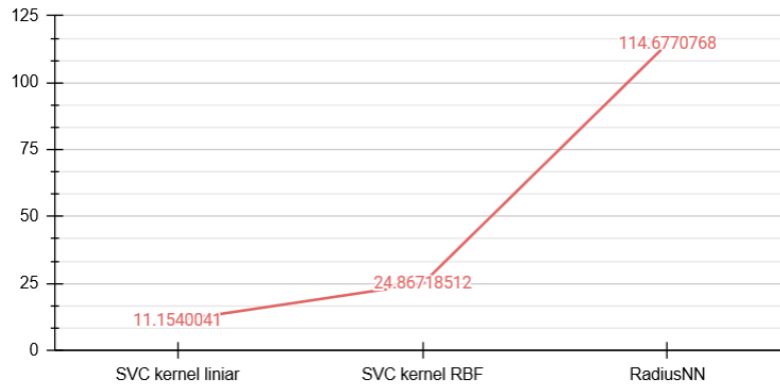


Fig. 6.22. Timpul necesar de testare pentru 100 de cadre

În concluzie, analizând rezultatele obținute se observă că, la introducerea unui set nou de date, scorul algoritmilor analizați, exceptând SVC cu kernel liniar care nu a reușit dea un rezultat satisfăcător, a scăzut față de scorul avut în după optimizare. Aceste diferențe sunt: -7,31% în cazul algoritmului SVC cu kernel RBF, respectiv -3,07 % în cazul algoritmului Radius KNN, având ca set nou de date 100 de cadre. Pentru analiza setului nou de date de 1000 de cadre rezultatele au fost următoarele: -19,02% în cazul algoritmului SVC cu kernel RBF, respectiv -14,39 % în cazul algoritmului Radius KNN.

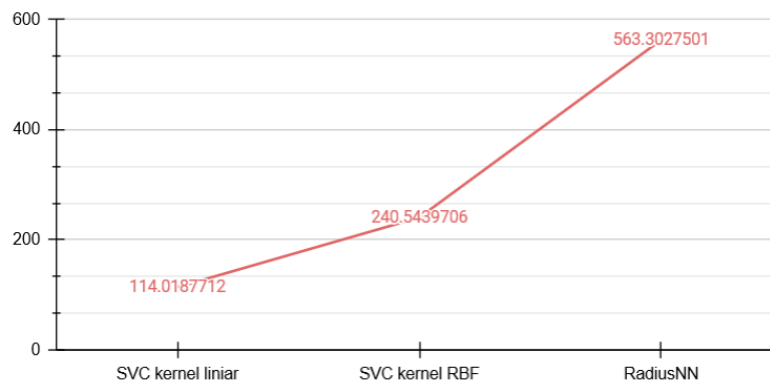


Fig. 6.23. Timpul necesar de testare pentru 1000 de cadre

Tabelul 23: Valorile timpilor necesari de testare pentru seturi de date noi

Algoritm		SVC (Kernel liniar)	SVC (Kernel RBF)	Radius KNN
100 cadre	Timp necesar pentru testare (minute)	11.15	24.86	114.67
1000 cadre	Timp necesar pentru testare (minute)	114.01	240.54	563.30

Criteriul final de departajare între cei doi algoritmi este dat de măsurarea timpului necesar de testare. Putem observa în graficele afișate ca RadiusNN își păstrează caracterul consumator de timp. Desi rezultatul scorului este cu 2% mai mare față de SVC cu kernel RBF, timpul necesar acestei procesări este de pana la 3 ori mai mare. Cum acest criteriu este foarte important pentru proiect, propunem ca estimator câștigător **algoritmul SVC cu kernel RBF**.

VII. CONCLUZII FINALE

În această lucrare sunt prezentate o serie de studii legate de detectarea descărcării Corona cu ajutorul unui sistem de avioane fără pilot, în vederea reducerii pierderilor de putere activă pe rețelele de înaltă și foarte înaltă tensiune de pe teritoriul României.

Capitolul I, cuprinde introducerea în problematica tezei, prezentând modul de abordare a problemei din punct de vedere teoretic și ideologic, urmând o amplă documentare cu privire la: stadiul actual al cercetărilor în ceea ce privește apariția descărcării Corona pe liniile electrice aeriene de înaltă tensiune din Romania, factori de risc și cauzele apariției; stadiul actual al utilizării sistemelor de avioane fără pilot în vederea detectării descărcării Corona, prezentând ultimele tehnologii în domeniul roboților autonomi cățărați, hibridi sau aeriени capabili să execute inspecții ale LEA.

Capitolul II, fiind dedicat, în totalitate, descărcării Corona și a metodelor de detectare a acesteia, s-a ajuns la concluzia că cea mai eficientă metodă de detectare a descărcării Corona o reprezintă folosirea senzorului UV. De asemenea, cu ajutorul mediului de simulare Matlab-Simulink, s-a reușit interpolarea a două metode de calcul a pierderilor Corona, anume ecuația lui Peek și ecuația lui Peterson, ajungând la rezultate apropiate de măsurătorile executate în mediul real, pe liniile de înaltă tensiune.

În capitolul III, a fost realizată o descriere a contextului în care UAV-ul va fi folosit pentru zbor pe LEA și o introducere în domeniul sistemelor de avioane fără pilot unde a fost prezentată structura funcțională a unui sistem UAV.

Din punct de vedere matematic și grafic modelarea unui aparat de zbor este foarte dificil de realizat, datorită complexității acestuia. În secțiunea III.2, a fost proiectat un sistem de comandă automată pentru controlul zborului UAV-ului Sky Walker, pe canalul longitudinal, în regim de urcare și menținere a altitudinii. În urmă calculului modelului matematic al canalului longitudinal și simularea acestuia în Matlab, folosind modulul Simulink, s-a ajuns la rezultate foarte bune în ceea ce privește controlul altitudinii de zbor.

De asemenea, a fost realizat un scenariu în urma căruia au fost comparate două tronsoane ale unei linii electrice aeriene de 400 kV, unul într-o zonă muntoasă, iar celălalt într-o zonă de câmpie. În urma comparației a rezultat o analiză asupra reliefului, condițiilor atmosferice și a legăturii de comunicații dintre sistemului UAV și stația terestră de sol, ducând la concluzia că pierderile de tensiune cauzate de descărcarea Corona sunt mult mai greu de detectat și calculat în zona muntoasă.

În capitolul IV este prezentată analiza parametrilor unui zbor de test și calibrare, iar rezultatele sunt prezentate grafic, relevând o stabilitate a zborului care conferă o încredere ridicată pentru misiuni de zbor viitoare pe liniile electrice aeriene. Tot în aceste grafice se observă că unghiurile de atitudine reale ale UAV-ului urmăresc fidel unghiurile de atitudine comandate, făcând astfel ca acuratețea datelor livrate de pilotul automat să fie ridicată.

La subcapitolul IV.1 este prezentată misiunea de zbor pe o linie de înaltă tensiune de 400 kV din tronsonul LEA Brașov – Gutinaș, județul Brașov. În urma zborului, au fost survolați un număr de 5 stâlpi, iar rezultatele analizei parametrilor de zbor au fost foarte bune.

Astfel că, sistemul UAV își păstrează altitudinea de zbor, relativ constant, comportamentul unghiurilor de atitudine este bună, astfel încât comanda pe canelele de ruluu, tangaj și girație este îndeaproape urmărită de UAV.

În concluzie, sistemul UAV proiectat a răspuns foarte bine la testele de calibrare, la zborul de verificare și, în final, la misiunea de survolare a LEA.

În capitolul V este propus un algoritm de detectare, urmărire și clasificarea a descărcării Corona implementat printr-un software denumit CDC (Corona Discharge Clasification). Acest software a fost, în totalitate, contribuția mea personală, având ca scop detectarea și analiza descărcărilor Corona. După identificare, acest fenomen este urmărit și procesat la bordul unui UAV, configurat special pentru misiuni tipice de zbor pe liniile de înaltă tensiune.

Algoritmii de clasificarea a descărcării Corona a fost permanent îmbunătățit fiind adăugate blocuri de calcul ajutătoare care au rolul de a facilita procesul de clasificare prin furnizarea unor parametri cum ar fi : distanța la țintă, coordonatele țintei și înălțimea de zbor. De asemenea, în schema bloc din fig.5.2, în cadrul sistemului de detectare a descărcării Corona se prelucrează parametri recepționați de la pilotul automat și de la sistemul RTK (Real Time Kinematics), care înlocuiește cu succes sistemul GPS, demonstrând o acuratețe mai bună.

Propunerea de alegerea a unui algoritm de clasificare a descărcării Corona a venit în baza analizei mai multor algoritmi specifici învățării supervizate, cât și a învățării nesupervizate. Modelele lor matematice au fost studiate în prealabil și am decis ca pentru analiza performanțelor legate de scor, acuratețe și timp necesar de testare să folosesc doar învățarea automată supervizată.

Pentru demonstrarea alegerii celui mai bun algoritm de învățare automată supervizată, în urma comparării unui număr de 8 algoritmi, analiza acestora s-a desfășurat pe parcursul unui număr de 4 experimente abordate etapizat.

Așadar, experimentul I demonstrează utilitatea modulului de preprocesare și scoate în evidență alegerea etajelor de filtrare ducând la o creștere a scorului, cât și a acurateții algoritmilor de clasificare de la 10% până la 30%.

Pentru experimentul numărul II, la setul de date numărul 1, se adaugă încă un set de date (setul de date numărul 2), obținut experimental în laborator și format dintr-un număr de aproximativ 1000 de cadre video reprezentând imagini înregistrate de camera Corona PCO Ultraviolet asupra unei instalații de generare a descărcării Corona. În urma experimentului II, analizând performanțele algoritmilor de clasificare se observă că ies în evidență 2 algoritmi, care au avut rezultate constant bune, și anume, SVC cu kernel RBF și Radius KNN.

În cazul experimentului III pentru procesare de imagini Corona, s-a efectuat optimizarea parametrilor de bază ai algoritmilor de clasificare analizați, folosind metoda GridSearchCV, specifică pachetului software de Python Scikit. În urma optimizării, s-a observat o creștere semnificativă, în raport cu rezultatele experimentului II, în cazul algoritmului SVC cu kernel liniar, creșterea ajunge până la 14,27%. Algoritmii SVC cu kernel RBF și Radius KNN, prezintă, de asemenea, creșteri, dar nu atât de importante.

Experimentul IV a fost dedicat validării algoritmilor aleși cu un set de date nou introdus. Astfel că, testarea s-a realizat pe setul de date achiziționate prin survolarea spațiului aerian cu un dispozitiv UAV asupra cărora a fost adăugat artificial un efect asemănător

descărcării Corona. În cadrul experimentului IV, s-au realizat 2 teste, anume pe o fracțiune de 100 de imagini și pe un grup de 1000 de imagini.

Pentru algoritmi selectați câștigători în toate rundele de experiment s-a observat comparativ o stabilitate și o evoluție mult mai bună, atât la testare cu o fracțiune de 100 de cadre noi, cât și la testarea cu un set de date de 1000 de cadre noi. Deși rezultatele sunt mai scăzute decât în ultima etapă de test, acest lucru era de așteptat lucrând cu un set de date complet nou. Scăderea este totuși în parametri ce permit încă utilizarea lor într-un scenariu real. Stabilitatea modelelor de ecuații din spatele predictorului propun SVC cu kernel RBF și RadiusNN ca variante plauzibile pentru un sistem de clasificare în timp real al descărcării Corona. Totuși, criteriul final de departajare între cei doi algoritmi a fost dat de măsurarea timpului necesar de testare. Astfel comparând performanțele legate de timpul necesar de testare al celor 2 algoritmi se observă că RadiusNN își păstrează caracterul consumator de timp. Deși rezultatul scorului este cu 2% mai mare față de SVC cu kernel RBF, timpul necesar acestei procesări este de până la 3 ori mai mare. Cum acest criteriu este foarte important pentru proiect, estimatorul câștigător și propunerea mea pentru realizarea unui sistem de clasificarea a descărcării Corona, este algoritmul SVC cu kernel RBF.

În baza celor prezentate mai sus, consider că teza de doctorat cu titlul ”Contribuții la dezvoltarea unui sistem de monitorizare a pierderilor pe liniile electrice de înaltă tensiune prin supravegherea cu avioane fără pilot” și-a atins scopul pentru care a fost propusă aducând elemente de noutate atât în domeniul sistemelor de avioane fără pilot care zboară pe liniile de înaltă tensiune, cât și asupra procesării semnalului video recepționat de la camera Corona în vederea detectării, urmăririi și clasificării descărcării Corona.

VIII. CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE

Pe baza celor arătate mai sus, se poate susține afirmația că lucrarea de doctorat prezentată conține contribuții personale semnificative, atât la nivel conceptual, prin propunerea de survolare a liniilor de înaltă tensiune cu un sistem de avioane fără pilot cu aripă fixă în detrimentul UAV-urilor cu aripă rotativă, cât și la nivel practic prin realizarea de zboruri specifice cu sistemul UAV proiectat și configurat special pentru realizarea de zboruri în vederea detectării, urmăririi și clasificării descărcării Corona.

Pentru a demonstra efectele negative ale descărcării Corona și pentru a evidenția amploarea pierderilor pe LEA, a fost elaborat un model de simulare numerică, cu ajutorul programului Matlab – Simulink, la baza căruia stau formulele analitice de calcul a pierderilor Corona, și anume, formula lui Peek și formula lui Peterson.

De asemenea, proiectarea unui traseu de zbor specific liniilor de înaltă tensiune pe baza unei analize asupra formelor de relief, a factorului atmosferic și a legăturii de date a UAV-ului cu stația terestră de control, este o contribuție personală.

Realizarea simulării numerice a unui sistem de comandă automată pentru controlul zborului UAV-ului Skywalker, pe canalul longitudinal, în regim de urcare și menținere a altitudinii este considerată o contribuție personală.

Zborurile de verificare și calibrare a parametrilor UAV-ului, realizate pe aerodromul Sânpetru, cât și zborurile efective pe linia de înaltă tensiune de 400 kV, Brașov – Gutinaș, au

fost realizate cu succes, iar în urma acestora au fost analizați parametrii UAV-ului astfel încât acesta a fost capabil să păstreze ruta de zbor programată și să mențină o altitudine stabilă pe tot parcursul misiunii.

Dezvoltarea la nivel conceptual și propunerea unei idei de abordare a clasificării descărcării Corona prin crearea software-ului CDC (Corona Discharge Clasification) este, din punctul meu de vedere, cea mai mare realizare personală din această lucrare. De asemenea, demonstrarea funcționalității, din punct de vedere matematic, a blocurilor de urmărire a țintei (descărcarea Corona), a blocului de calcul a distanței la țintă și a blocului de calcul a coordonatelor țintei reprezintă o mare realizare în contextul implementării acestor calcule la bordul UAV, executate în timp real.

Toate cele 4 seturi de date folosite în analiza algoritmilor de învățare automată supervizată sunt contribuție proprie și au fost achiziționate prin metode originale și proprii.

Prezentarea unora dintre rezultatele efortului științific, care a stat la baza elaborării tezei de doctorat, în cadrul unor conferințe științifice naționale, cât și internaționale, confirmă originalitatea și gradul de noutate al rezultatelor obținute.

Dintre **direcțiile viitoare de cercetare**, se poate menționa procesarea de imagini video de la camera Corona cu ajutorul implementării unor algoritmi de inteligență artificială (rețele neuronale, deep learning) mai buni și care pot crește acuratețea și scorul apariției descărcării Corona, cât și estimarea eventualelor pierderi pe baza extragerii pixelilor albi din cadrele video analizate.

Dezvoltarea unei aplicații de afișare a rezultatelor care poate fi comandată de utilizator, cât și implementarea fizică și software a tuturor blocurilor proiectate și demonstrare matematic, la bordul unui sistem UAV-ului, reprezintă o prioritate viitoare.

Ca cercetări viitoare îmi propun găsirea unei ecuații care să lege cele două sisteme dinamice ale proiectului: sistemul de avioane fără pilot și descărcarea Corona, folosind ca parametri variabili : viteza de zbor a UAV-ului, distanța la țintă, înălțimea de zbor și viteza de deplasare a pixelilor dintr-o regiune de interes (ROI), definită automat la apariția descărcării Corona în cadrele video.

Un alt lucru pe care mi-l propun în viitorul apropiat este realizarea unui nou set de zboruri care să devină mai concludent decât anterioarele și care să urmărească strict traseul de zbor creat special pentru zboruri pe LEA.

Implementarea algoritmului realizat pe placa de procesare Nvidia TX2 și evaluarea timpilor de calcul astfel încât algoritmul în ansamblu să fie fiabil pentru analiza unui număr mare de cadre video, reprezintă, de asemenea, o prioritate viitoare.

Având în vedere cele prezentate mai sus, proiectul deschide direcții noi de cercetare și poate fi analizat în vederea implementării la nivel industrial în cadrul companiilor transportatoare de energie electrică.

Bibliografie selectivă

1. Transelectrica –"Strategia energetică a României pentru perioada 2007 - 2020 actualizată pentru perioada 2011 – 2020".
6. G. Dong, X. Chen, B. Wang, J. Zhang, L. Liu, Q. Wang, and C. Wei, "Inspecting transmission lines with an unmanned fixed-wings aircraft," in Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2012 2nd International Conference on, Sept 2012, pp. 173–174.
7. H. Sharma, R. Bhujade, V. Adithya, and P. Balamuralidhar, "Visionbased detection of power distribution lines in complex remote surroundings," in Communications (NCC), 2014 Twentieth National Conference on, Feb 2014, pp. 1–6.
8. Z. Li, T. S. Bruggemann, J. J. Ford, L. Mejias, and Y. Liu, "Toward automated power line corridor monitoring using advanced aircraft control and multisource feature fusion," Journal of Field Robotics, vol. 29, no. 1, pp. 4–24, 2012.
20. Luis F. Luque-Vega, Bernardino Castillo-Toledo, Alexander Loukianov, Luis Enrique Gonzalez-Jimenez, Power Line Inspection Via an Unmanned Aerial System Based on the Quadrotor Helicopter, 17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Beirut, Lebanon, 13-16 April 2014.
21. <https://www.thedroneu.com/blog/how-to-use-drones-for-powerline-inspections/>
22. M. Nayerloo, X. Chen, W. Wang, JG Chase, "Cable-Climbing Robots for Power Transmission Lines Inspection", Mechanical Engineering Department, University of Caterbury, Chrischurch, New Zealand.
24. W. Chang, G. Yang, J. Yu, Z. Liang, L. Chen, C. Zhou, "Development of a Power Line Inspection Robot with Hybrid Operation Modes", International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, ISSN: 2153-0866, 24-28 September, 2017.
26. Joseph L. Moore, "Powerline Perching with a Fixed-Wing UAV", Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, June, 2011.
27. Maxim Lu, Alex James, Mahdi Bagheri, "Unmanned Aerial Vehicle (UAV) charging from powerlines", IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Bangalore, India, 8-10 November, 2017.
28. Milan Simic, Cees Bil, Vuk Vojisavljevic, "Investigation in Wireless Power Transmission for UAV Charging", Procedia Computer Science, Volume 60, 2015, pp. 1846-1855.
29. L. Matikainen, M. Lehtomäki, E. Ahokasa, J. Hyyppä, M. Karjalainen, A. Jaakkola, A. Kukko, and T. Heinonen, "Remote sensing methods for power line corridor surveys," ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, vol. 119, pp. 10-31., 2016.
30. D. I Jones and G. K Earp, "Camera sightline pointing requirements for aerial inspection of overhead power lines," Electric Power Systems Research, vol. 57, no. 2, pp. 73-82, 2001.
32. Andrew J. Moore, Matthew Schubert, Nicholas Rymer, "Autonomous Inspection of Electrical Transmission Structures with Airborne UV Sensors NASA Report on Dominion Virginia Power Flights of November 2016", NASA/TM-2017-219611, Langley Research Center, <https://www.flir.com/suas/uas-for-utility-inspection/>
33. Yin Limin, Zhangyu L., "Ultraviolet Image Processing Method in Corona Discharge", Second International Workshop on Computer Science and Engineering, 2009.
43. Y. Kim and K. Shong, "The Characteristics of UV Strength According to Corona Discharge from Polymer Insulators Using a UV Sensor and Optic Lens", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 3, 2011, pp. 1579-1585.
44. W.T. Hu and S. H. Wang, "Brief Discussion on Influence Factors in Detecting Corona Discharge by UV Detector", North China Electric Power, No. 1, 2009.
45. L. Chen, X. M. Bian, F. L. Chen, X. B. Meng, L. M Wang and Z. C. Guan, "Method to Judge Corona Inception Voltage of AC Transmission Lines Using Corona Cage", High Voltage Engineering, Vol. 37, No. 1, 2011, pp. 85-90.
70. Popovici D., Lolea M., "Tehnica tensiunilor înalte", Facultatea de Energetică, Universitatea din Oradea, 2011.
76. Evan Mayerhoff, "Corona and its effects", High Voltage Connection, Inc., 2007.

96. Enesi Asizehi Yahaya, Tsado Jacob, Mark Nwohu, Ahmed Abubakar, "Power loss due to Corona on High Voltage Transmission Lines", IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), Volume 8, Issue 3 (Nov. - Dec. 2013), PP 14-19.
97. Drăgan Gleb – Tehnica tensiunilor înalte, Volumul I, Ed. Tehnică, București, 1996.
98. J. B. Gupta, "A course in power systems", S. K. Kataria & Sons, New Delhi, 2008.
99. C. L. Wadwah "Electric Power System" Chennai, New Age International. Publisher Ltd, 2006.
100. B. R. Gupta "Power system analysis and design" S. Chand, New Delhi, 2007.
102. Samuel C. Hassler and Fulya Baysal-Gurel, "Unmanned Aircraft System (UAS) Technology and Applications in Agriculture", Agronomy Journal, 9 October 2019.
146. Juraj Micek, Jan Kapitulik, "Median Filter", Journal of Information, Control and Management Systems, Vol.1, (2003), No.2.
148. Prakhar Ganesh, "Types of Convolution Kernels: Simplified", Towards Data Science, Computer Vision and Deep Learning Section, October, 2019.
156. Hsin-Yuan Huang, Chih-Jen Lin, "Linear and Kernel Classification: When to use Which?", Department of Computer Science, National Taiwan University.
159. H.-F. Yu, F.-L. Huang, and C.-J. Lin. Dual coordinate descent methods for logistic regression and maximum entropy models. MLJ, 85:41–75, 2011.
160. V. Vapnik. Statistical Learning Theory. Wiley, New York, NY, 1998.
162. https://scikit-learn.org/stable/modules/cross_validation.html

Lista lucrărilor științifice

1. **Vidan Cristian**, Jula Nicolae, Martin Timmerman, Robby Haelterman, "*Detection Of High Voltage Lines Based On Analyzing Images Received From An Uav In Order To Detect Corona Discharge*", KBO Conference, 11-13 June 2015, Sibiu, Romania, WOS:000379493200128, ISSN: 1843-6722
2. Răzvan-Viorel Mihai, **Cristian Vidan**, Radu-Călin Pahonie, Pericle Matei, Adrian Mihail Stoica, Ioana Adochiei, "*A Semi-Autonomous Small Scale Paramotor Used for Medical Emergency Situations*", The 5th Edition of the International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB 2015), 19-21 November 2015, Iasi, Romania, WOS:000380397900184, ISBN:978-1-4673-7545-0, ISSN: 2575-5137.
3. Ioana Edu (Adochiei), Teodor Lucian Grigorie, Felix Adochiei, Petre Negrea, **Vidan Cristian**, Nicolae Jula, "*Assistive Inertial 3D Positioning MEMS System*", The 5th Edition of the International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB 2015), 19-21 November 2015, Iasi, Romania, WOS:000380397900189, ISBN:978-1-4673-7545-0, ISSN: 2575-5137.
4. **Vidan Cristian** "*Lateral Guidance Laws For Autonomous Tracking Flight Paths*", The 18 edition of International Conference „Scientific Research and Education in the Air Force-AFASES 2016“, 26-28 May 2016, Brasov, Romania.
5. **Vidan Cristian**, Badea Silviu-Ionut, "*Longitudinal automatic control system for a light weight aircraft*", International Conference of Aerospace Sciences (AEROSPATIAL 2016), 26-27 october 2016, Bucharest, Romania.
6. **Vidan Cristian**, Mărăcine Mihaela, "*Corona discharge classification based on UAV data acquisition*", The 21th International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS21), 29-31 may 2017, Bucharest, Romania, WOS:000449004400099, ISBN:978-1-5386-1839-4
7. **Vidan Cristian**, Maracine Daniel "*Studying the possibility of increasing the flight autonomy of a rotary wing MUAV*", The 19 edition of International Conference „Scientific Research and Education in the Air Force-AFASES 2017“, 26-28 May 2017, Brasov, Romania.
8. **Vidan Cristian**, Alexandru Gavril, Mihai Razvan, Catargiu Florin, "*On-board UAV video processing for ground target tracking*", The 20th edition of International Conference „Scientific Research and Education in the Air Force-AFASES 2018“, 22-27 May 2018, Brasov, Romania.

9. Florin CATARGIU, **Cristian VIDAN**, Răzvan MIHAI, Gavril ALEXANDRU, "Helical Antenna Design for Automated UAV Tracking System", MTA Review Magazine, XXVIII, Military Technical Academy, Bucharest, 2018.
10. Marian Gaiceanu, Silviu Epure, Cristinel Radu Dache, Razvan Buhosu, Iulian Ghenea, **Cristian Vidan**, "Laboratory power inverter platform for variable speed drive", 5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), 20-22 Oct. 2017, Galați, Romania, WOS:000428234400065, ISBN:978-1-5386-2059-5, ISSN: 2378-3907.
11. Marian Gaiceanu, Razvan Buhosu, Iulian Ghenea, **Cristian Vidan**, "Complete regenerative distributed drive system", 5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), 20-22 Oct. 2017, Galați, Romania, WOS:000428234400063, ISBN:978-1-5386-2059-5, ISSN: 2378-3907.
12. **Cristian Vidan**, Răzvan-Viorel Mihai, Marian Găiceanu, George Alexandru Ilie, "Designing and altitude controller for a miniUAV using an automated speed device", ICNPAA 2018, Mathematical, Problems in Engineering, Aerospace and Science, 16-17 July 2018, Yerevan, Armenia, WOS:000468353100104, ISBN:978-0-7354-1772-4, ISSN: 0094-243X.
13. Mihai Razvan-Viorel, **Vidan Cristian**, Gavril Alexandru, Alexandru Radu, "Cooperative distributed collision avoidance estimates in a dynamic environment for a heterogenous UAV formation", ICNAAM 2018, 16th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, 13-18 September 2018, Rhodes, Greece, AIP Conference Proceedings 2116, 360007 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5114367>.
14. **Vidan Cristian**, Mihai Razvan-Viorel, Sava Cristina, Gaiceanu Marian, Tăban Ovidiu, Catargiu Florin, "UAV Mission Planning Interface development with trajectory optimization algorithm", ICNAAM 2018, 16th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, 13-18 September 2018, Rhodes, Greece, AIP Conference Proceedings 2116, 360006 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5114366>.

Proiecte de cercetare

1. **Sistem avansat pentru reducerea pierderilor în transportul utilităților de interes strategic, bazat pe infrastructura IT și supraveghere aeriană autonomă (INSAV).** Programul Operațional Sectorial Creșterea Competitivității Economice, Axa prioritară 2 – Competitivitate prin CDI, Operațiunea 2.3.3: Promovarea inovării în cadrul întreprinderilor. Nr. Proiect : 1752 / Cod SMIS – CSNR 47532. Durata: 2013-2016 (33 luni) - **Membru în echipa de cercetare.** Link: <http://www.insoft-dc.ro/insav>
2. **Platforme UAV (vehicule aeriene fără pilot uman) cu capacități dedicate și infrastructură suport, pentru aplicații în misiuni de securitate națională (UAVino).** Programul Operațional Sectorial Creșterea Competitivității Economice, Axa prior. 2 – Compet. prin CDI. Durata: 36 luni - **Membru în echipa de cercetare.** Link: <http://www.incas.ro/images/stories/PN-III/UAVino/index.html> - PN-III-P2-2.1-SOL-2016-01-0008.
3. **Soluții și sisteme pentru activități de monitorizare și lucru aerian în sprijinul sistemului de sănătate publică în cazul pandemiei COVID-19 utilizând sisteme UAS,** Programul din PN III: Creșterea competitivității economiei românești prin cercetare, dezvoltare și inovare - **Membru în echipa de cercetare.** PN-III-P2-2.1-SOL-2020-2-0329.
4. **Dezvoltarea de prototipuri de ventilatoare cu parametri adaptați pentru asistarea pacienților infectați cu virusul SARS-CoV-2.** Programul din PN III: Creșterea competitivității economiei românești prin cercetare, dezvoltare și inovare - **Membru în echipa de cercetare.** PN-III-P2-2.1-SOL-2020-2-0337.
5. **Platformă experimentală pentru testarea și evaluarea echipamentelor și sistemelor compatibile cu standardul de comunicații MIL-STD-1553.** Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naționale pe 2019. Poziție plan: 90 - **director de proiect.**
6. **Sistem aerian fără pilot pentru supraveghere și cercetare cu posibilitatea de realizare acțiuni cinetice.** Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naționale pe 2019. Poziție plan: 168 - **director de proiect.**
7. **Utilizarea vehiculelor submersibile autonome în acțiuni de luptă împotriva minelor.** Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naționale pe 2019. Poziție plan: 145 - **director de proiect.**