

SISTEM SPECIAL CONIC DE ÎNCĂRCARE FĂRĂ FIR A DRONELOR

Tiberiu TUDORACHE¹, Andrei MARINESCU², Adrian VINTILĂ³

¹ Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București

² ASTR, Craiova

³ ICMET, Craiova

tiberiu.tudorache@upb.ro¹, andrei.marinescu@ieee.org², adrian_vintila@icmet.ro³

Rezumat. Sistemele inductive de transfer de putere sunt integrate în zilele noastre în tot mai multe dispozitive electromagnetice. O aplicație cu potențial bun a unor astfel de sisteme este încărcarea wireless a bateriilor dronelor autonome/semiautonomie, aceste vehicule aeriene fiind folosite în ultimul deceniu pentru o mulțime de aplicații domestice sau militare. Raza de operare a acestor vehicule este limitată deoarece bateriile lor sunt limitate în dimensiune, greutate și energie stocată. Astfel, bateriile dronelor ar trebui încărcate mai des. Stațiile de încărcare fără fir (Wireless Charging System - WCS) răspândite într-o regiune de funcționare stabilă pot fi utilizate în acest scop odată ce dronile sunt echipate cu algoritmi inteligenți capabili să aleagă în mod optim cel mai apropiat suport de încărcare, pe baza unor parametri specifici precum: traseul programat, poziția dronului, starea de încărcare a bateriei, locațiile WCS, condițiile meteo etc.

WCS sunt mai flexibile și mai puțin sensibile la condițiile meteorologice (ploi, noroi, praf, vânt etc.) decât sistemele clasice de încărcare cu fir (Plug-In). Cu toate acestea, o bună aliniere a bobinelor transmițătorului și receptorului unui WCS rămâne un aspect provocator în cazul condițiilor meteorologice aspre (vânt puternic sau furtună), rezolvarea acestei probleme fiind esențială pentru un proces de încărcare eficient.

Soluția analizată în această lucrare este un WCS pentru drone capabil să funcționeze în condiții meteorologice dificile. Sistemul propus este capabil să centreze automat bobinele emițătorului (Tx) și receptorului (Rx) și să blocheze și să elibereze eficient drona folosind un sistem electromagnetic. Bobina Tx este montată pe un suport magnetic din beton, iar bobina Rx este montată pe o placă de ferită așezată pe partea inferioară a dronului. Analiza soluției propuse și determinarea caracteristicilor și performanțelor sistemului propus se realizează folosind metoda Elementelor Finite (EF) implementată în pachetul de programe profesional Flux®.

1. INTRODUCERE

Domeniul vehiculelor aeriene fără pilot (Unmanned Aerial Vehicles - UAV) precum și al sistemelor aeriene fără pilot (Unmanned Aerial Systems - UAS) a cunoscut în ultimul deceniu o dezvoltare fără precedent [1 - 2]. Deși până acum nu există reglementări internaționale în acest domeniu, UAV-urile sau dronile pot fi clasificate în funcție de tipul aripii, dimensiunea, capacitatea de sarcină utilă sau distanța de zbor. Indiferent dacă sunt destinate activităților utilitare, comerciale sau militare, zborul lor este ghidat de la sol prin schimbul de informații cu stația de bază [3] și raza de acțiune este limitată la durate de zbor relativ scurte datorită bateriilor lor a căror energie specifică este încă destul de scăzută [4]. Chiar dacă bateriile evoluează de la valorile actuale de energie specifică de circa 200 Wh/kg până la valori de ordinul a 500 Wh/kg, valori preconizate pentru anul 2026 [5], reîncărcarea lor și asigurarea condițiilor de stabilitate a acestora rămân subiecte de actualitate.

Încărcarea eficientă și sigură a bateriilor dronelor poate fi efectuată cu ajutorul tehnologiei clasice bazate pe contact electric (Plug-In) sau cu ajutorul tehnologiei fără contact (Wireless). Tehnologia bazată pe transfer energetic fără contact (Wireless Power Transfer -

WPT) reprezintă o soluție mai flexibilă, în special în condiții vitrege de mediu (vânt, furtună, ploaie, praf, noroi etc.) [6]. Pentru aplicarea sa la drone, o condiție esențială este reprezentată de stabilitatea cuplajului Tx-Rx (Tx - bobină transmițător, iar Rx - bobină receptor), care necesită o formă specială a bobinelor, diferită de cea plană obișnuită [7], sensibilă la descentrarea acestora la aterizare, întrucât forța electromagnetică de atracție dintre bobinele este destul de redusă [8-10].

Soluția propusă în această lucrare constă într-un sistem de încărcare wireless a dronelor echipat cu bobine tronconice, cu posibilitate naturală de autocentrare, capabil să asigure un cuplaj magnetic constant. Această soluție care a fost utilizată anterior la vehiculele subacvatice autonome (Unmanned Underwater Vehicles - UUV) [11] este prevăzută în plus cu un sistem electromagnetic suplimentar pentru menținerea dronei în poziție fixă pe durata procesului de încărcare, chiar și în condiții atmosferice nefavorabile.

Sistemul de încărcare este alcătuit dintr-o bobină transmițător (Tx) de formă tronconică dispusă pe un suport din beton magnetic [12], respectiv dintr-o bobină receptor (Rx) dispusă pe o foaie flexibilă din ferită (1 mm grosime) dispus pe partea inferioară a dronei, Fig. 1.

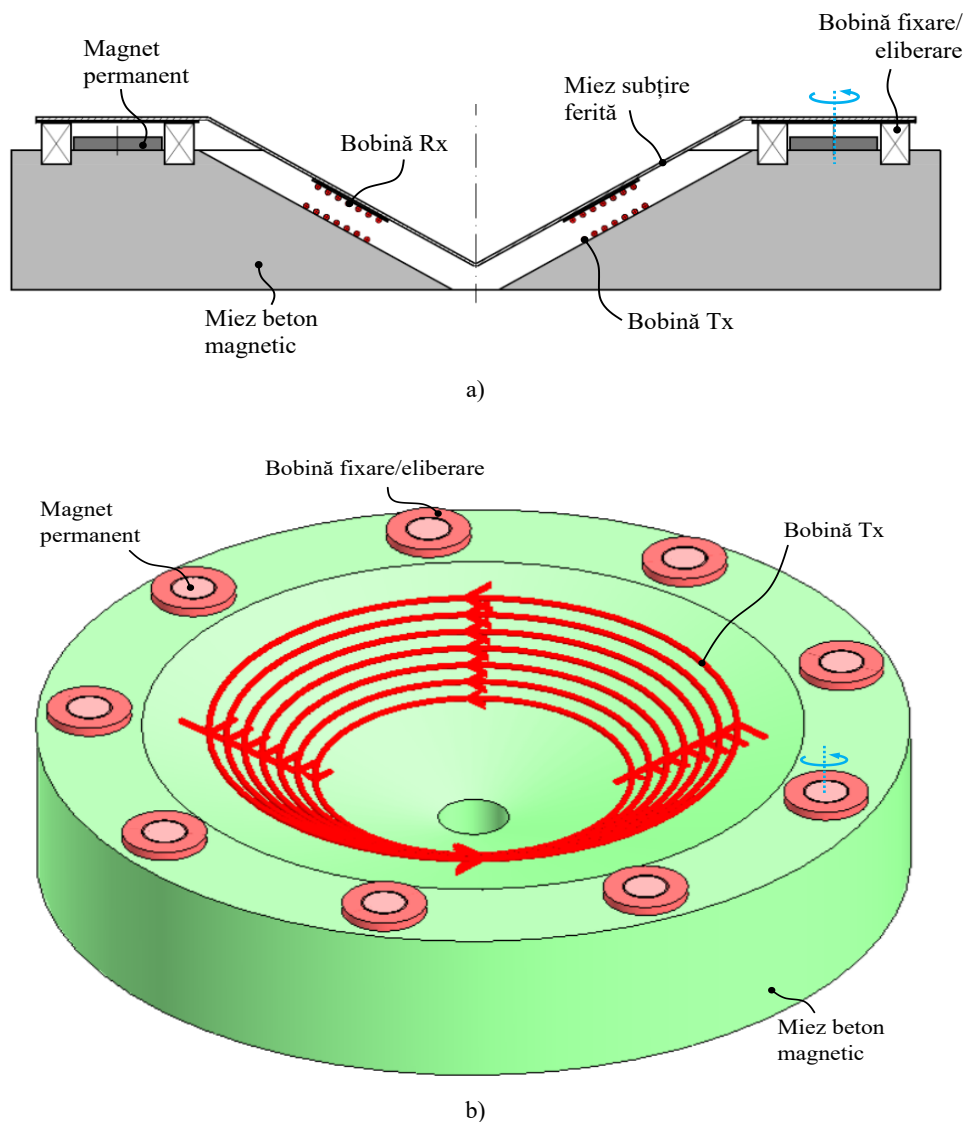


Fig. 1. Arhitectura sistemului conic de încărcare wireless a dronelor care asigură autocentrarea bobinelor și fixarea/eliberarea electromagnetică a acestora; a) vedere laterală; b) reprezentare 3D cu evidențierea poziției magneților și a bobinelor de fixare/eliberare.

Centrarea preliminară a bobinelor Tx și Rx se efectuează în mod automat prin natura geometriei speciale tronconice a acestora, respectiv a structurilor pe care sunt dispuse. Pe marginea suportului din beton magnetic sunt dispuși în plus mai mulți magneți permanenți care asigură forța de atracție necesară fixării dronei pe stația de încărcare pe durata procesului de încărcare wireless a bateriei dronei în condiții meteo dificile. Pentru eliberarea dronei, după finalizarea procesului de încărcare, se utilizează bobine alimentate în curent continuu sau în impulsuri unipolare, dispuse în jurul magneților permanenți care generează un câmp magnetic demagnetizant ce slăbesc forța de atracție exercitată asupra dronei, permițând decolarea acesteia, Fig. 1b). În condiții meteo extreme (vânt, furtună etc.), aceleași bobine pot fi alimentate cu un curent invers, capabil să întărească acel câmp magnetic produs de magneți și să sporească forța de atracție exercitată asupra dronei.

Obiectivele principale ale acestei lucrări constau în elaborarea unui model numeric de tip element finit 2D care să permită evaluarea forțelor de atracție ce acționează asupra dronei pentru un sistem de încărcare wireless dat, respectiv analiza influenței unor parametri funcționali (solenajia bobinei, înălțimea bobinei de fixare/eliberare, distanța dintre bobină și miezul de ferită) asupra performanței sistemului electromagnetic.

2. DESCRIEREA MODELULUI NUMERIC DE TIP ELEMENT FINIT

Analiza numerică efectuată în cadrul acestei lucrări a urmărit evaluarea influenței unor parametrii geometrici ai bobinei de blocare/eliberare asupra forței electromagnetice. Studiul a avut la bază metoda elementului finit utilizând pachetul de programe de calcul de câmp profesional Flux® [13].

Întrucât toți magneții și bobinele lor asociate sunt structuri identice, studiul unei singure structuri va oferi informații relevante pentru întreg sistemul de fixare/eliberare a dronei. Influența sistemului de fixare/eliberare asupra performanțelor sistemului de încărcare wireless se neglijează și nu face obiectul acestui studiu.

Luându-se în considerare geometria cu simetrie axială a magneților permanenți, respectiv a bobinelor de fixare/eliberare analiza de tip element finit este una de tip 2D axisimetrică axa de simetrie fiind cea marcată cu săgeată albastră în Fig. 1 b).

Domeniul de calcul 2D al câmpului electromagnetic asociat sistemului de blocare/eliberare include un singur magnet permanent (NdFeB), bobina de blocare asociată, miezul din beton magnetic ($\mu_r = 26$) din imediata vecinătate [12], miezul subțire de ferită de pe dronă și aerul înconjurător, Fig. 2. În cadrul studiului efectuat se consideră bobina dispusă simetric față de magnet pe direcție axială, aceasta fiind parțial îngropată în suportul din beton magnetic, Fig. 2. Bobinele sunt alimentate cu o solenajie constantă, aceasta reprezentând una dintre sursele de câmp electromagnetic.

Frontiera la infinit este modelată printr-o regiune specială numită *Infinite box* implementată în pachetul de programe Flux® [13]. Rețeaua de discretizare asociată domeniului de calcul este reprezentată în Fig. 3.

Dimensiunile magnetului permanent, a bobinei de fixare/eliberare, a miezului din beton magnetic și a miezului flexibil din ferită montat pe partea inferioară a dronei, distanța dintre magnet și miezul de ferită sunt date în Tabelul 1 pentru modelul de referință [10].

Problema de câmp electromagnetic 2D (regim cvasistaționar magnetic inductiv tranzitoriu) asociată studiului sistemului electromagnetic de fixare/eliberare este guvernată de ecuația diferențială cu derivate parțiale exprimată în potențial magnetic vector \mathbf{A} [13]:

$$\text{rot} [(1/\mu) \cdot \text{rot } \mathbf{A}] = \mathbf{J}_s \quad (1)$$

unde μ is permeabilitatea magnetică, iar \mathbf{J}_s este densitatea de curent sursă.

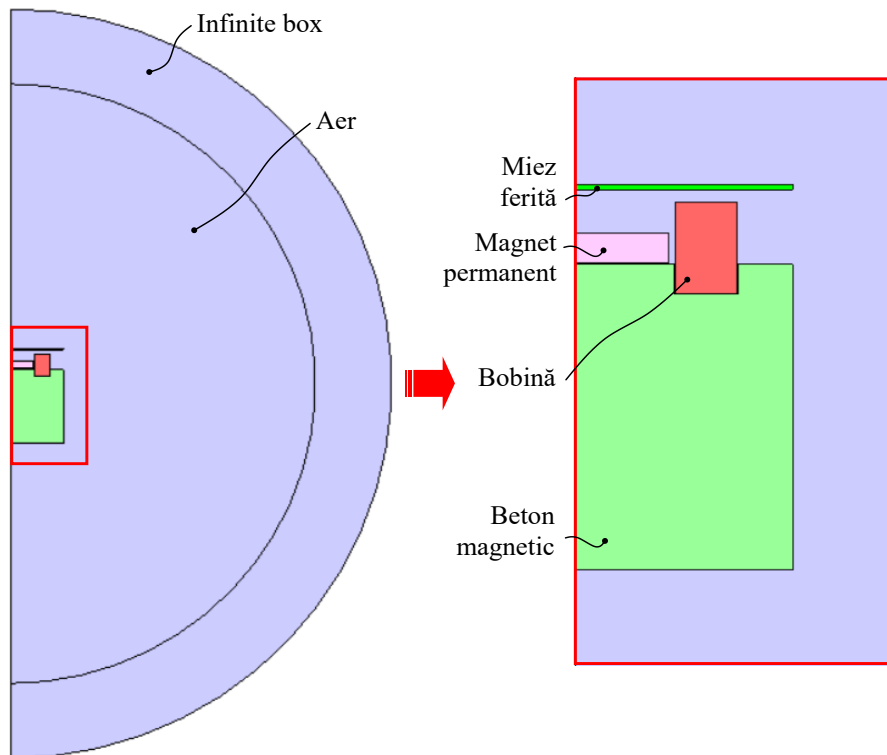


Fig. 2. Domeniul de calcul 2D al problemei de câmp electromagnetic.

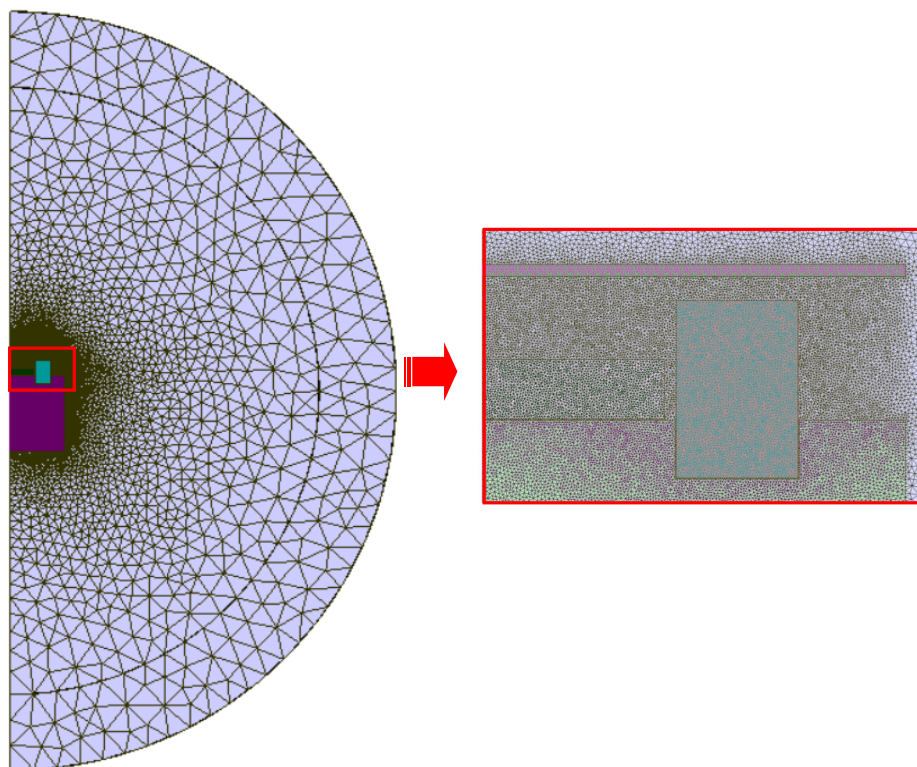


Fig. 3. Rețeaua de discretizare a domeniul de calcul 2D.

Tabel 1.

Dimensiuni principale sistem electromagnetic de fixare/eliberare de referință.				
Dimensiuni magnet permanent [mm]		Dimensiuni bobină [mm]		
Diametru	Înălțime	Diametru exterior	Diametru interior	Înălțime
30	5	52	32	15

Miez flexibil din ferită [mm]		Miez din beton magnetic [mm]	Distanță bobină-ferită [mm]	
Lățime	Grosime	Grosime	Lățime	
70	1	50	70	2

3. REZULTATE NUMERICE

3.1. Influența înălțimii bobinei de eliberare și a solenației

În prima etapă a studiului efectuat în cadrul lucrării s-a analizat influența înălțimii bobinei de eliberare și a solenației acesteia asupra performanței sistemului de fixare/eliberare a dronei. Bobinele dispuse pe marginea suportului din beton magnetic sunt parțial îngropate în acesta și centrate pe direcție verticală în raport cu magnetii permanenți. Astfel, în urma simulărilor efectuate pentru diferite înălțimi ale bobinelor în gama [10 ÷ 30] mm (aria transversală a bobinei rămâne neschimbată) și pentru valori ale solenației în gama [-3000 ÷ 3000] Asp s-au obținut rezultatele numerice prezentate în Fig. 4 a) și Fig. 4 b) unde sunt afișate valorile forței de atracție exercitate asupra dronei de către o singură structură de tip magnet-bobină. Pentru calculul forței totale, aceste valori trebuie înmulțite cu numărul de magneți.

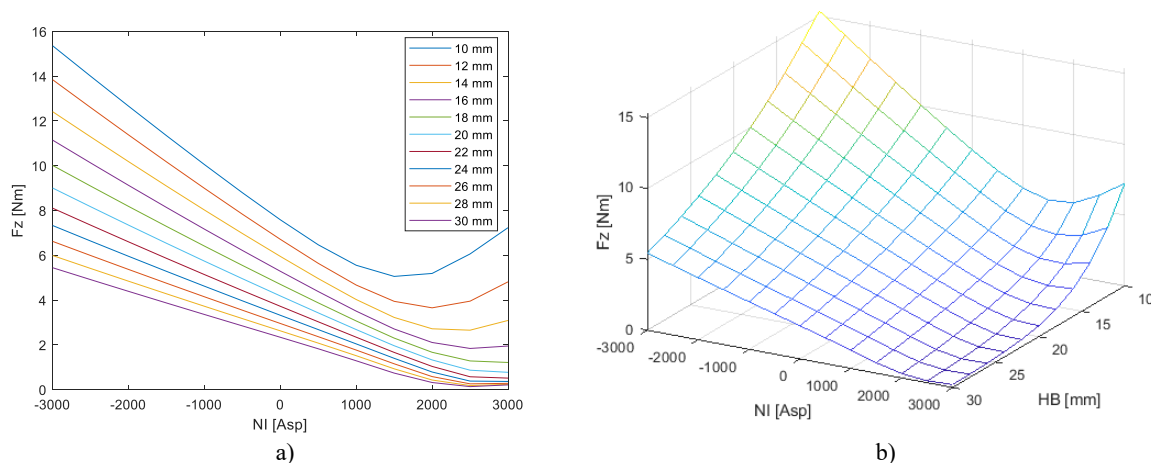


Fig. 4. Dependența forței de atracție funcție de înălțimea bobinei HB și de solenație NI; a) reprezentări bidimensionale pentru diferite înălțimi HB; b) reprezentare tridimensională.

Rezultatele numerice prezentate în Fig. 4 a) evidențiază, în general, o scădere a forței de atracție F_z odată cu creșterea solenației (de la -3000 Asp la 3000 Asp) până la o valoare minimă, urmată de o creștere a acesteia. Se observă, de asemenea, că pentru o solenație dată, forța de atracție F_z scade cu înălțimea bobinei HB (aria transversală a bobinei rămâne neschimbată).

O mărime importantă în funcționarea sistemului electromagnetic de fixare/eliberare a dronei este raportul dintre forța de atracție F_{zmag} produsă exclusiv de magneți (fără consum energetic) și forța de atracție minimă obținută după alimentarea bobinelor de demagnetizare

F_{zmin} , adică raportul $KF = F_{zmag}/F_{zmin}$. Valoarea F_{zmin} ar trebui să fie cât mai mică pentru a permite decolarea cu ușurință a dronei, iar, prin urmare, raportul KF ar trebui să fie cât mai mare.

În Fig. 5 se prezintă raportul KF funcție de înălțimea bobinei HB . Se observă că factorul KF crește semnificativ cu înălțimea bobinei HB . Dacă se corelează aceste rezultate cu cel din Fig. 4 se observă că totodată, creșterea parametrului HB determină o scădere a forței F_z . Prin urmare trebuie făcută o alegere de compromis între cele două mărimi.

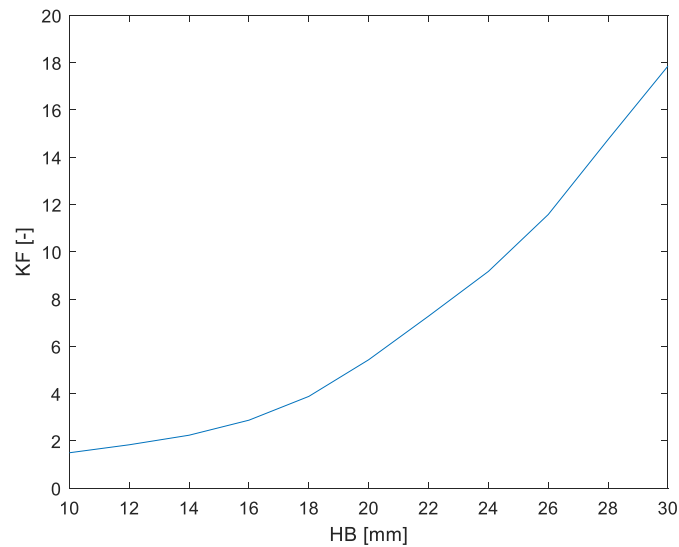


Fig. 5. Factorul KF funcție de înălțimea bobinei HB .

3.2. Influența distanței dintre bobină și dronă și a solenației

În a doua etapă a studiului s-a analizat influența distanței dintre bobina de eliberare și dronă DZ , respectiv a solenației NI bobinei asupra performanței sistemului de fixare/eliberare a dronei. Simulările numerice s-au efectuat pentru diferite distanțe DZ în gama $[2 \div 10]$ mm și pentru valori ale solenației în gama $[-3000 \div 3000]$ Asp. Rezultatele numerice prezentate în Fig. 6 a) și Fig. 6 b) unde sunt afișate valorile forței de atracție exercitate asupra dronei de către o singură structură de tip magnet-bobină.

Rezultatele numerice prezentate în Fig. 6 a) pune în evidență, de asemenea, în general o scădere a forței de atracție F_z cu creșterea solenației (de la -3000 Asp la 3000 Asp) până la o valoare minimă, urmată de o creștere a acesteia. Se observă, de asemenea, că pentru o solenație dată, forța de atracție F_z scade cu distanța DZ .

În Fig. 7 se prezintă raportul KF funcție de distanța dintre bobină și dronă DZ . Se observă că raportul KF crește cu distanța DZ . Coroborând aceste valori cu rezultatele din Fig. 6 se constată că trebuie aleasă o soluție de compromis în care forța F_z generată de magnetii permanenți să fie suficient de mare, iar raportul KF să fie în același timp suficient de important.

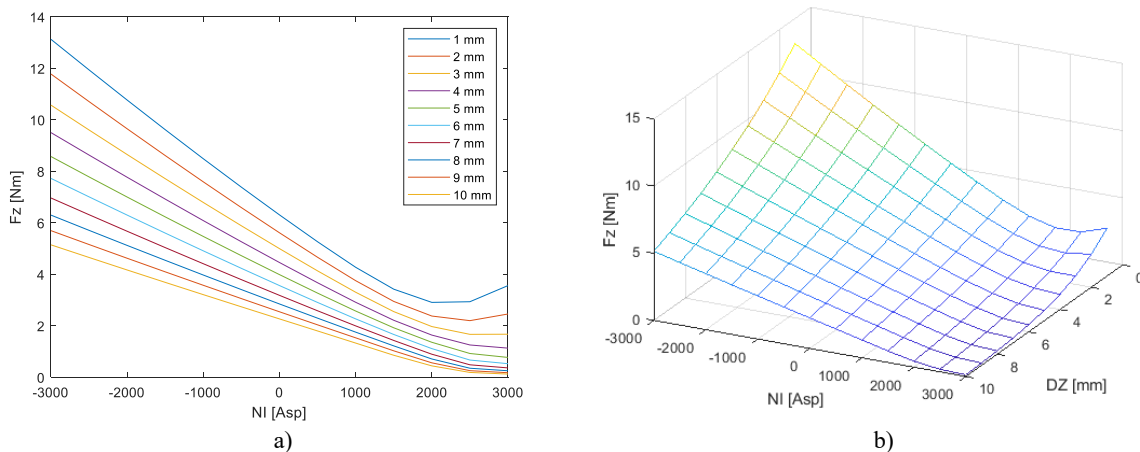


Fig. 6. Dependența forței de atracție funcție de distanța dintre bobină și dronă DZ și de solenație NI ; a) reprezentări bidimensionale pentru diferite distanțe DZ ; b) reprezentare tridimensională.

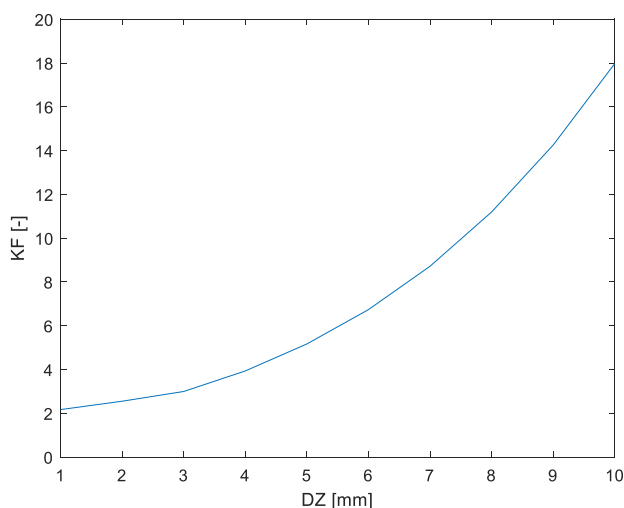


Fig. 7. Factorul KF funcție de distanța DZ .

4. CONCLUZII

În lucrarea de față se prezintă o analiză numerică a unei soluții speciale de încărcare wireless a dronelor prevăzute cu un sistem electromagnetic de fixare/eliberare a dronelor în condiții meteo dificile (vânt, furtună, etc.). Modelarea numerică a utilizat pachetul de programe profesional Flux și a permis analiza influenței unor parametri funcționali asupra performanțelor sistemului de fixare/eliberare.

Rezultatele numerice au evidențiat faptul că forța de atracție F_z a dronei scade cu creșterea înălțimii bobinei HB , respectiv scade cu distanța DZ dintre bobină și dronă.

O măsură a performanței sistemului electromagnetic de fixare/eliberare a dronei este raportul $KF = F_{zmag}/F_{zmin}$ care trebuie să fie cât mai mare. Simulările numerice au indicat faptul că acest factor crește cu înălțimea bobinei HB , respectiv cu distanța DZ . Coroborând datele privind forța F_z și raportul KF se evidențiază necesitatea adoptarea unei soluții de compromis care să ofere în același timp o forță de atracție suficient de mare, dar și un raport KF bun.

Pentru o dimensionare corespunzătoare a sistemului de fixare/eliberare trebuie ca forța de decolare a dronei F_d să fie mai mare decât suma dintre greutatea dronei G_d și forța minimă

F_{zmin} de atracție pe care o produce sistemul electromagnetic prin alimentarea bobinelor de eliberare ($F_d > G_d + F_{zmin}$). În caz contrar drona nu va mai fi capabilă să decoleze de pe stația de încărcare.

O alegere a parametrilor DZ și HB pentru a crește mult raportul KF (de pildă pentru $KF > 10$), ar putea conduce la obținerea unei forțe reduse de atracție F_z . În acest caz creșterea acestei forțe de atracție F_z necesare fixării dronei în condiții meteo dificile se poate obține prin creșterea numărului de magneți permanenți și a bobinelor aferente.

În cazul în care condițiile meteo sunt foarte dificile, se poate crește forța de atracție F_z pe durata încărcării dronei prin alimentarea bobinelor de fixare/eliberare cu solenație opusă (negativă în Fig. 4 și Fig. 6). Această măsură trebuie însă adoptată cu precauție (necesită investigații suplimentare) întrucât ea va determina un consum energetic suplimentar și o încălzire a bobinelor pe durata încărcării dronelor.

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XX, ediția 2024.

BIBLIOGRAFIE

1. M.J. Boyle, *The Drone Age*, Oxford University Press, pp. 400, 2020,
2. R. Merkert, J. Bushell, *Managing the drone revolution: A systematic literature review into the current use of airborne drones and future strategic directions for their effective control*, J. Air Transp. Manag., **89**, 101929, 2020.
3. ***Markets&Markets, *UAV Market Global Forecast to 2029*, Report Brochure AS 2y 802, 2004.
4. James Bond, *Electric Aircraft Battery Technology*, EaglePicher Technologies, 2022.
5. ***Markets&Markets, *Battery and Wireless Charging Market Research Reports*, <https://www.marketsandmarkets.com/battery-and-wireless-charging-market-research-263.html>.
6. Z. Zhang, H. Pang, A. Georgiadis et al., *Wireless power transfer - An overview*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **66**, 2, 1044–1058, 2019.
7. T. Campi, S. Cruciani, M. Felizian, *Wireless Power Transfer Technology Applied to an Autonomous Electric UAV with a Small Secondary Coil*, Energies, **11**, 352; 2018.
8. Z. Xing, K. Yan, G. Han et al., *A wireless transmission coupling structure with low electromagnetic force disturbance and stable coupling coefficient*, Journal of Physics: Conference Series, **1754**, 1, 12120, 2021.
9. G. Han, W. Yuan, Y. Liu, Q. Li, F. Chen, *Analysis of electromagnetic force on wireless charging structure*, Wireless Networks
10. T. Tudorache, A. Marinescu, A. Vintilă, *Electromagnetic Locking/Releasing System for UAVs Wireless Charging Stations*, ICATE conference, Craiova, 2024
11. G. Rosu, Gh. Samoilescu, A. Marinescu, O. Baltag, *The Efficiency of An Underwater Inductive Charging System for AUVs Based on Truncated Coils*, ISFEEE Conference, Galati, 2019.
12. Marinescu, T. Tudorache, I. Dumbrava, A. Vintila, *Comparative Assessment of Magnetic Concrete versus Ferrite for a High Power Inductive Coupler*, MPS Conference Cluj Napoca, 2021.
13. *** Cedrat: *User guide Flux® 11*, 2015.