



# Elektrostatska levitacija

Sara Studen

3.g.

Srednja škola Jastrebarsko

mentor: Vanja Novosel

Jastrebarsko 2023.

*Zahvaljujem se čestičnom fizičaru i doktorandu na CERN-u, Vasiliju Peroviću za savjete vezane uz izvedbu nekih od pokusa u ovom eksperimentalnom radu. Zahvaljujem se prof. Saši Rodiću za slike vezane uz pokus s korona izbojima i učenici Jeleni Bobinski za skice postava i skice korona izboja. Zahvaljujem se i svojoj mentorici Vanji Novosel na pruženoj pomoći za pisanje ovog rada, te uloženo vrijeme i trud.*

---

## Sažetak

U samom naslovu je formuliran problem koji se istražio u ovom eksperimentalnom radu – ovisnost elektrostatske levitacije o relevantnim parametrima. U radu je razjašnjen osnovni princip rada na kojem se bazira elektrostatska levitacija, te se izvedeni dokazi za sva predviđanja u radu. Prvim predviđanjem dokazano je kako elektrostatska levitacija nije moguća u vakuumu. U drugom predviđanju određeno je djelovanje određenih sila na NACA oblik tijekom levitacije s obzirom na korona izboje i određeni su oblici koji najbolje levitiraju pri različitim postavima ploča. Treće predviđanje nadovezalo se na drugo gdje se dokazalo kakve su boje korona izboja na krajevima NACA oblika. Četvrtim predviđanjem se potvrdila ovisnost ravnotežnog položaja o masi oblika tijekom levitacije. Petim predviđanjem se potvrdila ovisnost ravnotežnog položaja o površini ploča tijekom levitacije. Šestim predviđanjem se potvrdila ovisnost ravnotežnog položaja o udaljenosti između ploča. Sedmim predviđanjem utvrdila se ovisnost jakosti struje o obliku. Analizirani podatci prikazani su pomoću grafova i tablica. U ovom radu je prvi puta izveden pokus sa levitacijom između dvije ruke i potvrđeno je kako metalni oblik može levitirati i ako su ruke zamjena za kondenzatore i ako je čovjek dio strujnog kruga.

**Ključne riječi:** elektrostatska levitacija, NACA oblik, korona izboji, vakuum, ravnotežni položaj

---

## Sadržaj

Popis simbola.....	5
1 Uvod.....	6
2 Teoretska pozadina.....	7
2.1. Osnovni principi.....	7
2.2. Predviđanja.....	9
3 Postav eksperimenta.....	16
3.1. Postav i pribor.....	16
3.2. Parametri.....	19
4 Rezultati mjerenja i diskusija.....	20
4.1. Levitacija različitih NACA oblika u drugačijem postavu ploča.....	20
4.2. Levitacija u vakuumu.....	23
4.3. Korona izboji u mraku i sile na tijelo.....	24
4.4. Ovisnost ravnotežnog položaja o masi oblika.....	25
4.5. Ovisnost ravnotežnog položaja o površinama ploča.....	27
4.6. Ovisnost ravnotežnog položaja o udaljenosti između ploča.....	30
4.7. Ovisnost jakosti struje o obliku.....	31
4.8. Levitacija između dvije ruke.....	32
4.9. Diskusija.....	33
5 Zaključak.....	34
6 Literatura.....	35

---

## Popis simbola

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
m	kg	Masa
g	$m/s^2$	Akceleracija slobodnog pada
C	1	Konstanta proporcionalnosti (ovisi o geometriji)
U	V	Napon
$U_0$	V	Napon izboja
d, x	cm	Udaljenost između dvaju kondenzatora
$\mu_0$	$m^2 / (Vs)$	Mobilnost iona
Q	C	Naboj
$\epsilon_0$	C/(Vm)	Permeabilnost vakuuma
$\epsilon_r$	C/(Vm)	Permeabilnost sredstva
S	$cm^2$	Površina ploča (kondenzatora)
$\varphi$	V	Električni potencijal
$\varphi_0$	V	Napon inicijacije korone
$d_{udaljenosti}$	m	Udaljenost između ploča
$F_{EHD,d}$	N	Sila donje ploče
$F_{EHD,g}$	N	Sila gornje ploče
A, B, C	1	Konstante
$\alpha$	1	Električna pokretljivost
ds	m	Diferencijalni pomak
$\tau$	s	Vremenska konstanta

## 1. Uvod

Čitajući jedan diplomski rad vezan uz elektromagnetsku levitaciju (<https://www.bib.irb.hr/171804>), posebno sam se zainteresirala za sam pojam levitacije, te sam se i sama odlučila iskušati u jednom takvom eksperimentu.

Elektromagnetska levitacija bila mi je daljnji poticaj da krenem pisati ovaj rad i da krenem istraživati elektrostatsku levitaciju. Levitacija koju sam istraživala u ovome radu još uvijek je nedovoljno istražena i ima još daljnjeg prostora za istraživanje. Kako sam imala svu potrebnu aparaturu za izvesti ovaj eksperiment, odlučila sam izvesti ga i spoznati što je to uistinu levitacija.

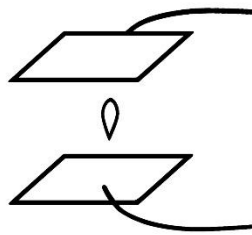
Levitacija je jedan od fizikalnih fenomena koji se ne susreće tako puno u redovnom sadržaju nastave fizike. Samu definiciju levitacije mogli bismo izreći kao lebdjenje tijela u odnosu na tlo ili neku podlogu, a pojam levitacija dolazi od lat. *levitas* što u prijevodu znači lakoća. Naravno levitacija se može podijeliti na nekoliko vrsta kao npr. elektromagnetska, akustična, aerodinamična, elektrostatska levitacija... Može biti uzrokovana privlačnom silom (kružno kretanje levitirajućeg tijela u polju privlačne sile) i odbojnom silom (elektricitet – elektrostatska levitacija ili magnetizam – dijamagnetska levitacija). Elektrostatska levitacija je levitacija koja se postiže uz pomoć električnog polja i elektrostatskog naboja, kako bi naelektrizirano tijelo moglo levitirati i da bi poništilo učinke gravitacije. Ovakva vrsta levitacije prema Earnshawovom teoremu nije moguća u čistom elektrostatskom polju sa klasičnim nabojem. Elektrostatska levitacija može se primijetiti pri podizanju čestica prašine s površine Mjeseca. U budućnosti zamišlja se i pogon mnogih svemirskih letjelica na principu elektrostatske levitacije.

## 2. Teoretski model i hipoteze

### 2.1. Osnovni principi

Za sam početak kvalitativne analize razmotrit će se kako se uopće postiže levitacija, koji su uzroci levitacije i NACA oblici<sup>1</sup> (*National Advisory Committee for Aeronautics, Nacionalni Savjetodavni odbor za aeronautiku*) te ostale vrste oblika koje su korištene u eksperimentu.

Kada se između dvije metalne ploče pod visokim naponom postavi metalni oblik u nekim slučajevima moguće je postići ono što zovemo elektrostatskom levitacijom (slika 1.).



Slika 1. Skica postava pri levitaciji

Levitacija koja je proučavana u ovom radu ne zasniva se samo na izjednačavanju sile teže i električne sile:

$$F_g = F_e \quad (1)$$

Jer bi pri tome levitali samo oblici mase:

$$m = \frac{qE}{g} \quad (2)$$

Pretpostavljam da oblik levitira zbog EHD -a (elektrohidrodinamičkog potiska), pojave koja je istražena u slučaju takozvanih „liftera.“ Lifter čine dvije elektrode, od kojih jedna ima puno manji radijus zakrivljenosti, pod visokim naponom. Kod dovoljno visokog napona doći će do električnog izboja pri čemu se u području oko elektrode ionizira zrak. Ioni pod utjecajem električnog polja ubrzavaju prema suprotno nabijenoj elektrodi pri čemu se sudaraju s neutralnim molekulama zraka i prenose im količinu gibanja što stvara takozvani ionski vjetar

<sup>1</sup> NACA sustav je jedan od shema aeroprofila, koji se temelji na geometrijskim značajkama profila.

koji stvara potisak na oblik. U radu se koriste izrazi za silu i jakost struje izvedeni za slučaj „liftera“ (3.) i (4.):

$$I = CU(U - U_0) \quad (3)$$

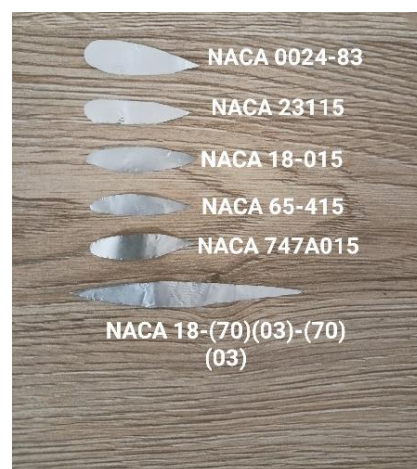
$$F = \frac{CU(U - U_0)}{\mu} \quad (4)$$

Pri čemu je  $C$  koeficijent prilagodbe,  $U$  napon,  $U_0$  napon izboja, a  $\mu$  mobilnost iona.

U ovom radu koristit ću NACA oblike. NACA oblici su oblici za krila aviona koje je razvio Nacionalni Savjetodavni odbor za aeronautiku. Serije NACA oblika osnovno se razlikuju prema svojim dimenzijskim karakteristikama (slika 2., 3.). Geometrijske značajke NACA oblika su: srednjica profila (krivulja čija je svaka točka jednako udaljena od gornjeg i donjeg ruba profila), tetiva profila (dužina koja spaja bilo koje dvije točke aeroprofila), os profila (najdulja tetiva koja spaja vodeći vrh „nos“ sa završnim vrhom „repom“ profila), duljina profila (duljina osi profila, odnosno udaljenost od nosa do repa profila), zakrivljenost profila (najveća međusobna udaljenost osi i srednjice profila) i debljina profila (udaljenost između gornjeg i donjeg ruba profila okomita na os profila). Ukupno postoji šest različitih vrsta NACA oblika. U eksperimentu su korištene sve serije NACA oblika, te još dva oblika izvan serija NACA oblika. Korišteni su NACA oblici i dva oblika izvan NACA serija jer su jedino oni od svih ostalih koji su isprobani u eksperimentu, levitirali.



Slika 2. Oblici korišteni u eksperimentu



Slika 3. NACA serije



Razmatrat će se parametri koji utječu na levitaciju – ionski vjetar (ioni), masa oblika, površine ploča (kondenzatora) i korona izboji na krajevima NACA oblika.

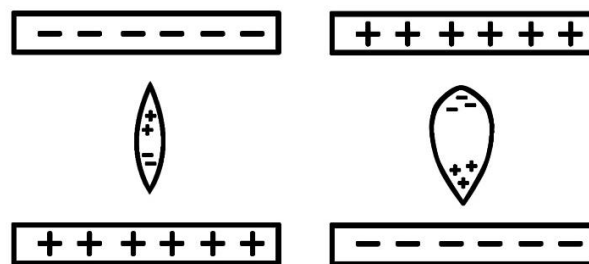
## 2.2. Predviđanja

### PREDVIĐANJE 1.

Kada tijelo levitira između dviju ploča (kondenzatora) prilikom levitacije prisutni su ioni, te dolazi do pojave ionskog vjetra. Levitacija se događa zbog EHD efekta kojeg uzrokuju ioni. Kada bi se cijeli sustav stavio u vakuum, gdje nisu prisutne čestice (ioni) pretpostavlja se da tijelo ne bi levitiralo jer ne bi bilo prisustva ionskog vjetra.

### PREDVIĐANJE 2.

U opisanom postavu na visoki su napone spojene dvije metalne ploče između kojih se postavlja metalni oblik. Pod utjecajem električnog polja dolazi do razdvajanja naboja



Slika 4. Razdvajanje naboja

unutar metalnog oblika. (Slika 4.) Pri dovoljno visokom naponu dolazi do korona izboja na samom metalnom obliku, a ne na pločama koje su spojene na visoki napon.

U slučaju kad je gornja ploča negativno nabijena na gornjem kraju oblika javlja se pozitivan korona izboj, a na donjem negativan. U slučaju gornje pozitivno nabijene ploče, događa se suprotno-na donjem kraju dolazi do pozitivnog korona izboja, a na gornjem do negativnog korona izboja. (slika 5.) Da bi oblik levitirao treba vrijediti:

$$F_g = F_{EHD,g} - F_{EHD,d} \quad (5)$$

Pozitivna korona sadrži manji broj elektrona, događa se pri visokom naponu, njezina razina energije je vrlo visoka. Negativna korona sadrži veći broj elektrona, događa se pri nižem naponu. Kada oblik levitira u postavu kada je gornja ploča negativno nabijena, a donja pozitivno, na gornjem dijelu oblika javlja se negativna korona, a na kraju oblika pozitivna

korona. Da bi oblik levitirao, sila koja djeluje prema gore mora biti jednaka sili koja djeluje prema dolje. Budući da prema dolje djeluje sila teža, u tom slučaju sila prema gore-sila koja se javlja zbog negativnog izboja mora biti veća od sile zbog pozitivnog izboja za iznos sile teže. Budući da je energija pozitivne korone veća, veća je i brzina ionskog vjetra koja nastaje zbog pozitivne korone (slika 6.) te će zbog toga sila prema dolje biti veća.

Tijelo na zakrivljenoj strani ima električni potencijal i radijus zakrivljenosti:

$$\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r_1} \quad (6)$$

Dok tijelo na oštroj strani ima električni potencijal i radijus zakrivljenosti:

$$\varphi_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_2} \quad (7)$$

Kako su pritom  $\varphi_1 = \varphi_2$  dobivamo:

$$\frac{Q}{r_1} = \frac{q}{r_2} \quad (8)$$

Polje na površini proporcionalno je površinskoj gustoći naboja što je ukupni naboj na kvadrat polumjera:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{Q/r_1}{q/r_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad (9)$$

Električno polje bit će veće na strani na kojoj je radijus zakrivljenosti manji:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad (10)$$

Prema (5.):

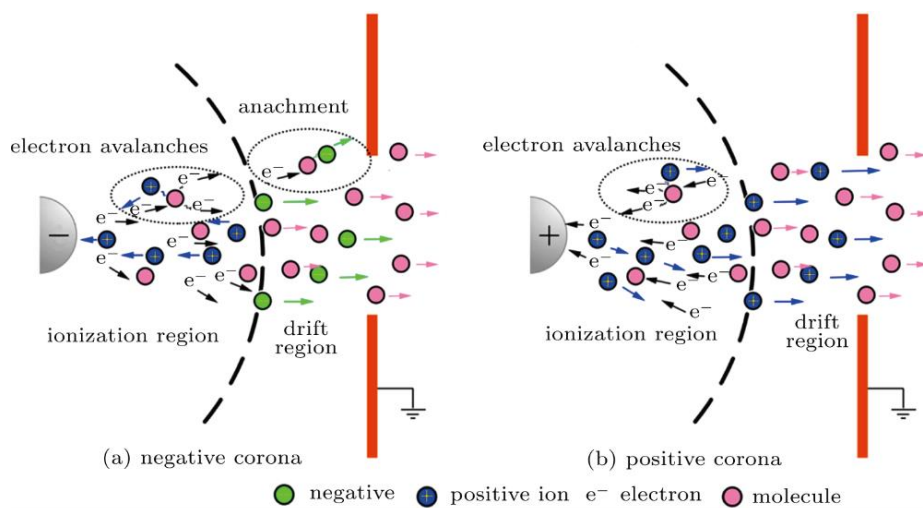
$$F_{EHD} = - \int \rho_{ext} \vec{E} dV \quad (11)$$

Iz čega slijedi da je sila veća na strani na kojoj je radijus zakrivljenosti manji. Dakle u ovom postavu gornja strana treba biti većeg radijusa zakrivljenosti od donje da bi oblik levitirao.

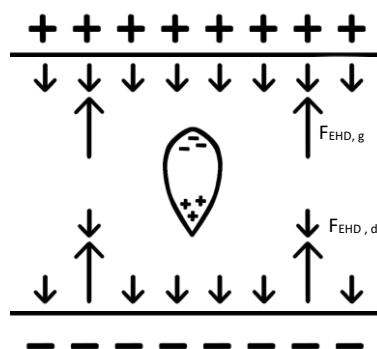
U slučaju gornje pozitivno nabijene ploče na donjoj strani javlja se pozitivan korona izboj pa je sila prema gore veća. U tom postavu omjer radijusa zakrivljenosti trebao bi biti manji nego u slučaju kad je gornja ploča negativno nabijena.

Pretpostavlja se da će pri postavi ploča +/- levitirati oblici koji su s gornje strane zaobljeni (većeg polumjera zakrivljenosti), a odozdo oštri jer je sila prema gore veća od sile prema dolje, a negativna korona je pritom slabija pa je i manja brzina ionskog vjetera. Ovakvi oblici zalijepiti će se u postavu ploča -/+ za donju (+) ploču jer je sila prema dolje veća od sile prema gore, a električno polje većeg polumjera zakrivljenosti manjeg je iznosa.

Pri postavu ploča -/+ pretpostavlja se da će levitirati oblici koji su s gornje strane oštri, a s donje strane većeg polumjera zakrivljenosti jer je pri tome sila prema dolje veća od sile prema gore, a pozitivna korona je pritom jača pa je i veća brzina ionskog vjetera. U ovakvom postavu za gornju ploču zalijepiti će se oblici koji s gornje strane imaju jako velik polumjer zakrivljenosti, a s donje strane su oštri jer je tada sila prema gore veća od sile prema dolje.



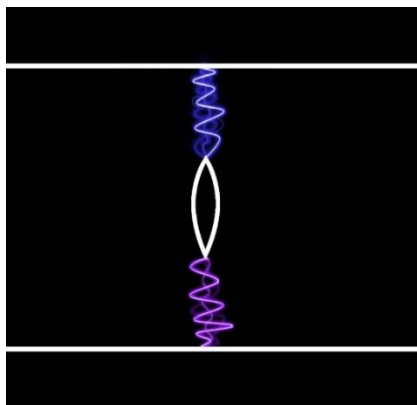
Slika 5. Korona izboji



Slika 6. Sile pri levitaciji metalnog oblika

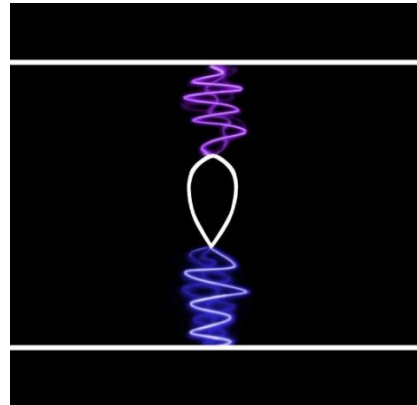
## PREDVIĐANJE 3.

Pozitivan korona izboj najčešće je plave/bijele boje, dok je negativan korona izboj često ljubičaste boje. Prema pretpostavci da se u postavci gornje ploče pozitivne, a donje negativne na gornjoj ploči događa negativan korona izboj postavlja se hipoteza da će pri +/- postavu na gornjoj strani oblika biti ljubičasta boja, a na donjoj plava. Pri postavu gornje negativno, a donje pozitivno nabijene ploče na gornjoj će strani biti plava boja, a na donjoj ljubičasta. Pri korona izboju pobuđuju se molekule dušika. Kad se vraćaju o niže energetske stanje emitiraju svjetlost u području od 300 do 400 nm. Zato su korona izboji ljubičaste, odnosno plave boje.



Slika 7. Umjetnički prikaz korona izboja

*pri -/+ postavu*



Slika 8. Umjetnički prikaz korona izboja

*pri +/- postavu*

*U pri +/- postavu (gornja pozitivno, a donja negativno nabijena ploča) na gornjoj strani oblika biti će ljubičasta boja izboja, a na donjoj plava.*

*Pri postavu gornje negativno, a donje pozitivno nabijene ploče na gornjoj će strani biti plava boja, a na donjoj ljubičasta.*

## PREDVIĐANJE 4.

Metalni oblik će levitirati ako vrijedi jednačba (3). U radu pod rednim brojem 7. u literaturi, autori su se bavili pitanjem levitacije liftera. U ovom radu uzela sam formule vezane uz lifter kako bih objasnila levitaciju metalnih NACA oblika. Tada sila između elektroda glasi:

$$F = \frac{Q}{T} \int \frac{ds}{\alpha} \quad (12)$$

Pri čemu je:

$$\int \frac{ds}{\alpha} = \frac{l}{\alpha} \quad (13)$$

Tada se dobiva:

$$F = \frac{Q l}{T \alpha} \quad (14)$$

Uzmemo da je ionska struja  $i = \frac{Q}{T}$  konstanta, te da je  $\alpha = \frac{q\tau}{m}$  konstanta, dobiva se:

$$F = (i) \left( \frac{ml}{q\tau} \right) \quad (15)$$

Tada je sila na elektrodama jednaka:

$$F = lA \quad (16)$$

Dobiva se:

$$mg = A_1(l - h - d) - A_2d \quad (17)$$

Tada je:

$$mg = A_1l - A_1h - A_1d - A_2d \quad (18)$$

Zaključuje se:

$$d = \frac{mg - B}{A} \quad (19)$$

*Predviđanje: ovisnost udaljenosti oblika od gornje elektrode o masi je linearna.*

## PREDVIĐANJE 5.

Povećanjem površina ploča povećava se kapacitet, zbog čega se smanjuje napon.

Iz jednadžbi (4) i (5) slijedi:

$$(C_1 + C_2)d = \frac{mgS^2}{AS - B} + C \quad (20)$$

Slijedi:

$$(C_1 + C_2)d = \frac{mgS^2}{A} - \frac{mgS}{B} + C \quad (21)$$

Zaključuje se:

$$d = AS^2 - BS + C \quad (22)$$

*Predviđanje: ovisnost udaljenosti oblika od gornje elektrode o površinama ploča je kvadratna.*

## PREDVIĐANJE 6.

Pretpostavlja se da ravnotežni položaj oblika ovisi i o udaljenosti između ploča.

Gledajući predviđanje 4. i formulu (12) dobivamo izraz:

$$d = Al - Ah - B \quad (23)$$

Tada vrijedi da je:

$$A_1l = -mg - A_1h - A_1d - A_2d \quad (24)$$

Za  $d$  tada vrijedi:

$$d = \left( \frac{A^1}{A^1 + A^2} \right) l - \left( \frac{A^1}{A^1 + A^2} \right) h - \left( \frac{mg}{A^1 + A^2} \right) \quad (25)$$

Tada se dobiva ovisnost ravnotežnog položaja o udaljenosti između ploča:

$$d = \frac{A_1l - A_1h - mg}{A^1 + A^2} \quad (26)$$

*Predviđanje: ovisnost udaljenosti oblika o udaljenosti od gornje elektrode o udaljenosti između ploča je linearna.*

#### PREDVIĐANJE 7.

Primjenom formule za struju pri levitaciji:

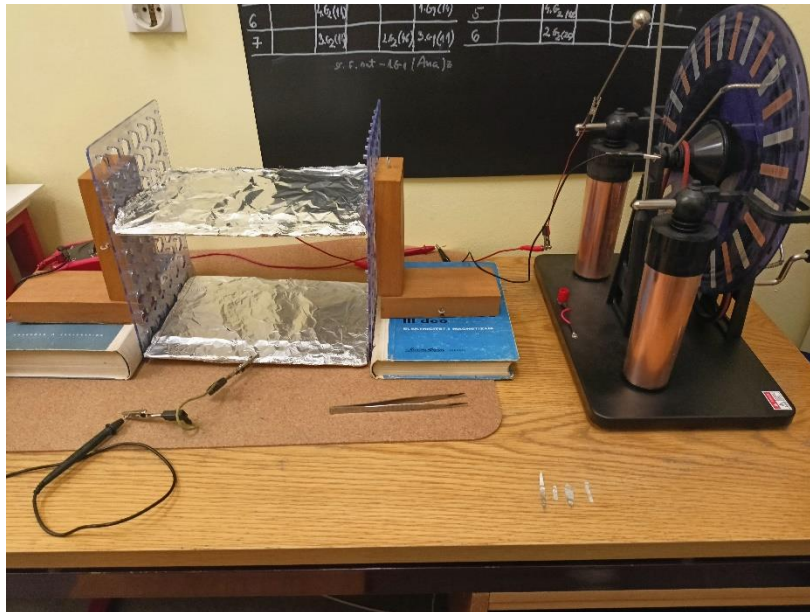
$$I = C\varphi(\varphi - \varphi_0) \quad (27)$$

Pri čemu je  $C$  konstanta proporcionalnosti i ovisi o geometriji oblika. Zaključuje se: struja ovisi o obliku koji levitira jer ovisi o koeficijentu prilagodbe  $C$ .

### 3. Postav eksperimenta

#### 3.1. Postav i pribor

U svrhu eksperimenta napravljeni su oblici od aluminijske folije prikazani na slici 3. Postav eksperimenta prikazana je na slici 9.

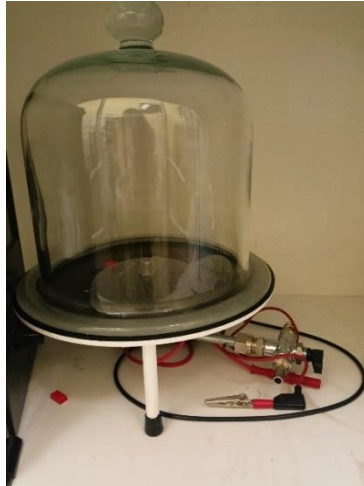


*Slika 9. Postav eksperimenta*

Glavni postav uključuje dvije plastične ploče omotane aluminijskom folijom, žice, pinceta, mobitel, Wimshurstov stroj pomoću kojeg se postigao visoki napon i oblici načinjeni od aluminijske folije.

Prilikom testiranja prvog predviđanja korišten je uz glavni postav vakuumsko zvono i vakuum pumpa (slika 10. i slika 11.). Manji glavni postav stavio se unutar vakuumske zvona, te se potom zvono priključilo na Wimshurstov stroj. Kada se upalila vakuum pumpa unutar vakuumske zvona se stvorio vakuum i zabilježena su opažanja prilikom levitacije izvan i unutar vakuuma. Postav ploča je bio +/-.





*Slika 10. Vakuumsko zvono*



*Slika 11. Vakuumpumpa*

Prilikom testiranja drugog i trećeg predviđanja korišten je glavni postav. Uz glavni postav korištena je i kamera zbog što preciznijih slika korona izboja u mraku. Postav ploča je bio +/-.

Prilikom testiranja četvrtog predviđanja korišten je glavni postav uz iste NACA oblike 8 serije s pet različitih masa i vaga (slika 12.). Snimljeni videozapisi levitacije oblika različitih masa analizirani su u programu *Tracker* gdje se odredila udaljenost između gornje ploče i gornjeg dijela oblika. Postav ploča je bio +/-.

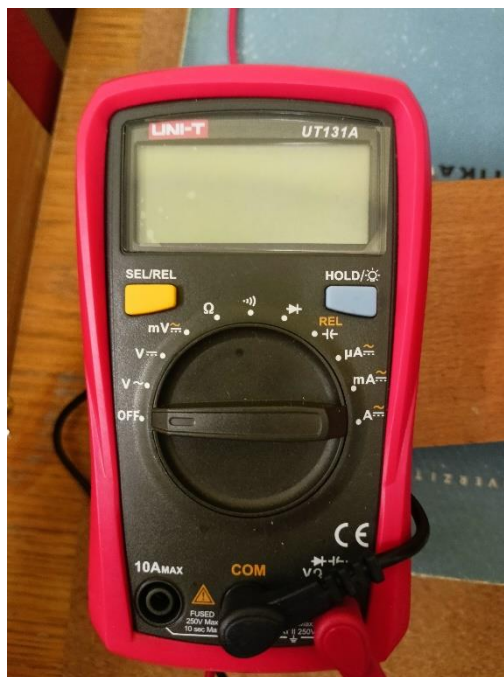


*Slika 12. NACA oblici 8 serije različitih masa, folije različitih masa i vaga*

Prilikom testiranja petog predviđanja korišten je glavni postav uz različite površine ploča. Ukupno je korišteno sedam različitih površina ploča. Snimljeni videozapisi analizirani su u programu *Tracker* gdje se odredila udaljenost između gornje ploče i gornjeg dijela oblika. Postav ploča je bio +/-.

Pri testiranju šestog predviđanja korišten je uobičajen glavni postav. Multimetar (slika 13.) potvrdio je konstantan iznos struje pri mjerenjima. Ravnomjerno okretanje ručice Wimshurstova stroja postignuto je tako što se odredio određeni otkucaji na metronomu kako bi se svaki puta okretala ručica stroja u istom ritmu.

Prilikom testiranja sedmog predviđanja korišten je glavni postav uz multimetar (slika 13.) pomoću kojeg se određivala struja prilikom levitacije pojedinog oblika. Smjer struje određivao se pomoću njega i pomoću elektroskopa. Obje šipke Wimshurstova stroja bile su povezane žicom s elektroskopom i negativno nabijen plastični štap, odnosno pozitivno nabijenu vunenu krpicu stavila se na vrh elektroskopa, te se kazaljka elektroskopa pomaknula ili je ostala mirovati. Ako je kazaljka elektroskopa mirovala, žica je bila + pol, a ako se kazaljka elektroskopa pomaknula žica je bila - pol. Mjerenja su vršena pri smjeru struje od + prema - i od - prema +.



*Slika 13. Multimetar*

Snimanje audio – materijala za analizu podataka kreće od trenutka kada se oblik stavi između dviju ploča i počne se okretati Wimshurstov stroj. Mobitel je postavljen ispred samog postava kako bi se ostvarila što bolja kvaliteta snimke. Svaka od snimci trajala je petnaestak sekundi.

### **3.2. Parametri**

Glavni parametri koji se mjere u eksperimentu su masa oblika, udaljenost dviju ploča, struja prilikom levitacije i površina ploča.

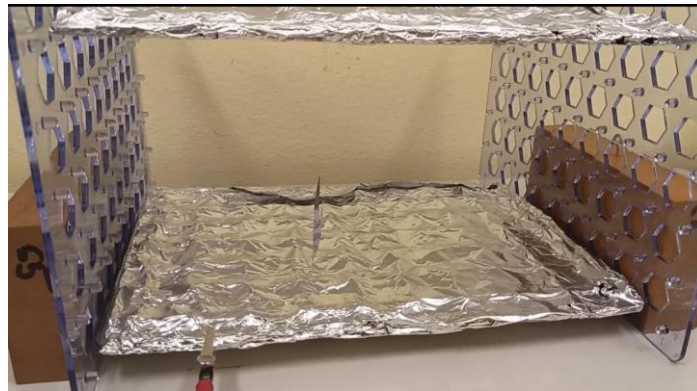
Ostali parametri koji ne utječu znatno na levitaciju oblika, neće biti uključeni u analizu podataka, ali će tijekom rezultata ostati konstantnog iznosa. Važno je naglasiti da će prilikom svih mjerenja biti korišten isti materijal za oblike koji levitiraju i za ploče (kondenzatore).

## 4. Rezultati mjerenja

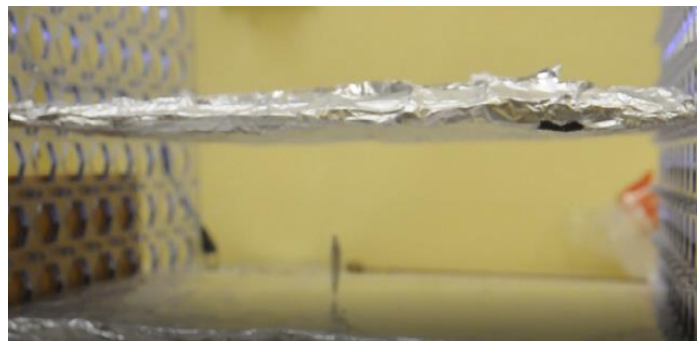
### 4.1. Levitacija različitih NACA oblika u drugačijem postavu ploča

Opažanja koja se događaju pri različitim levitacijama oblika u drugačijem sastavu ploča prikazani su na slikama.

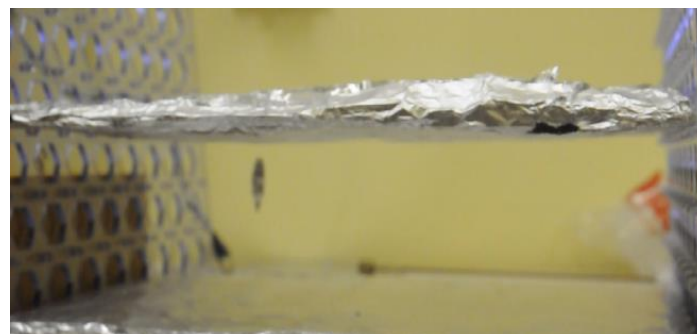
1) Postav ploča +/-



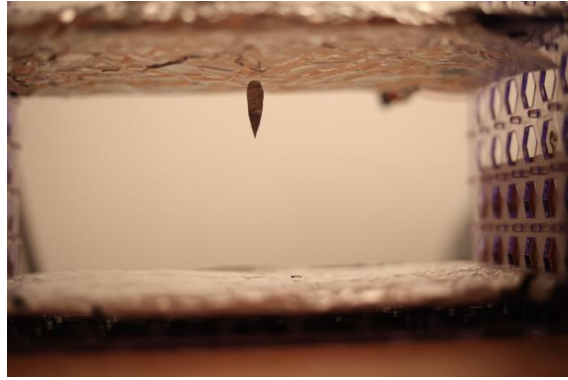
*Slika 14. Levitacija NACA 18-(70)(03)-(70)(03)-8 serija*



*Slika 15. Levitacija NACA 18-015 oblika*



*Slika 16. Levitacija NACA 747A015 oblika*

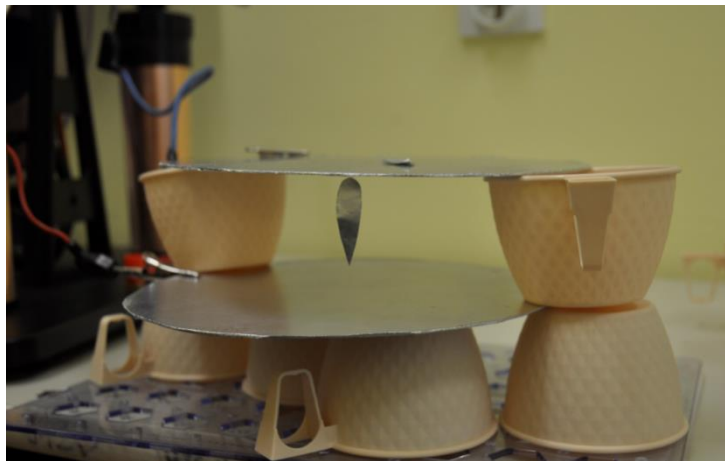


*Slika 17. Levitacija NACA 0024-83 oblika – 6 serija*

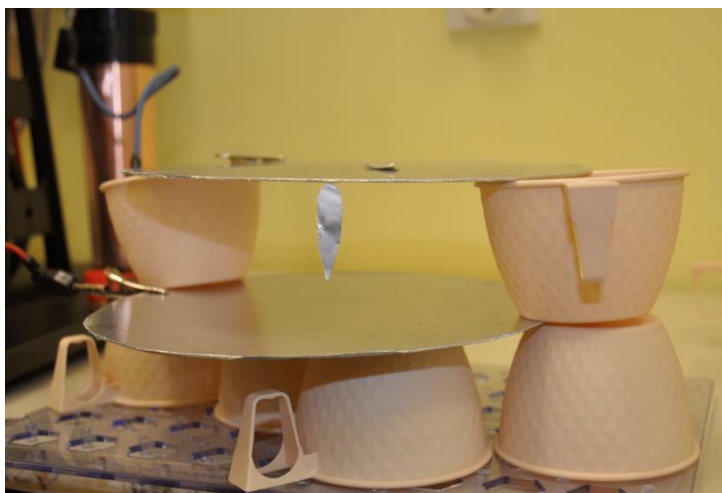
Od NACA 23115 do NACA 18-(70)(03)-(70)(03), bili su jako blizu gornjoj ploči (slika 16.) odnosno donjoj, a neki od njih bili su i svojim vrhom „spojeni“ sa gornjom pločom (slika 14., 15.). NACA oblik 0024-83 6 serije (slika 17.) najbolje je levitirao.

Ovime je potvrđeno predviđanje 2.

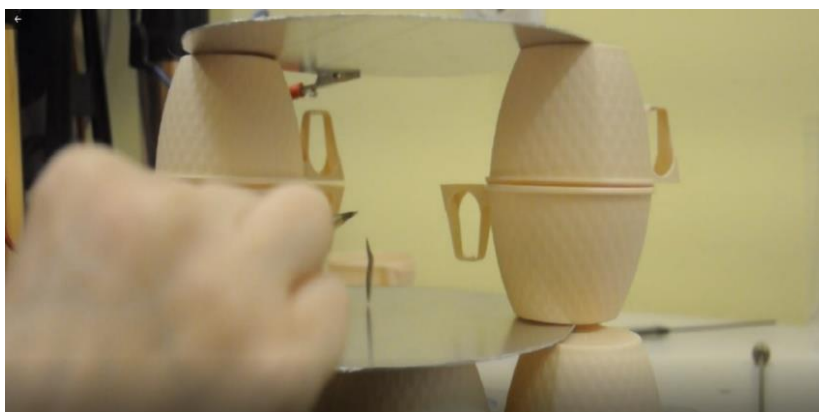
2) Postav ploča -/+



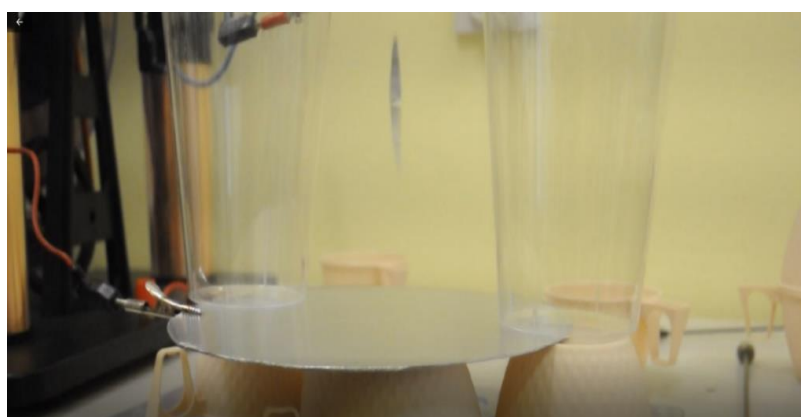
*Slika 18. Levitacija NACA 0024-83 oblika – 6 serija*



*Slika 19. Levitacija NACA 747A015 oblika*



*Slika 20. Levitacija NACA 18-015 oblika*



*Slika 21. Levitacija NACA 18-(70)(03)-(70)(03)-8 serija*

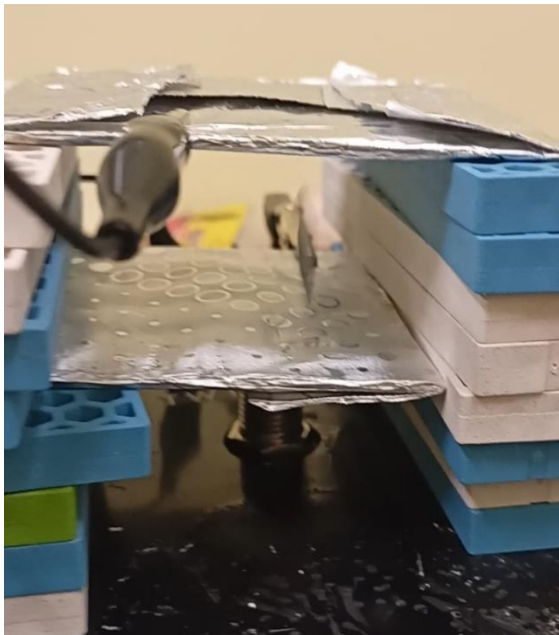


Od NACA 0024-83 do NACA 747A015, bili su jako blizu gornjoj ploči odnosno donjoj, a neki od njih bili su i svojim vrhom „spojeni“ sa gornjom pločom (slika 18., 19., 20.). NACA oblik 18-(70)(03)-(70)(03) (slika 28.) najbolje je levitirao.

Ovime je potvrđeno predviđanje 2..

#### 4.2. Levitacija u vakuumu

Opažanja koja se događaju pri levitaciji izvan vakuuma i unutar vakuuma biti će prikazani na slikama 22. i 23.



*Slika 22. Levitacija izvan vakuuma*



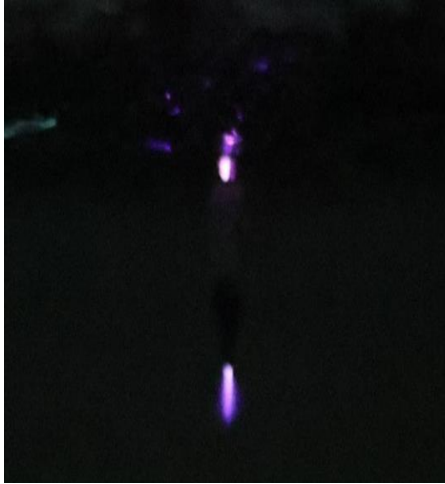
*Slika 23. Levitacija unutar vakuuma*

Kao što je dobiveno eksperimentom i time je potvrđeno predviđanje 1., levitacija unutar vakuumske zvonice, odnosno unutar vakuuma nije moguća čime je, uz hipotezu, potvrđeno i postojanje ionskog vjetrova bez kojeg sama elektrostatska levitacija nije moguća. Ovime je potvrđeno da su za elektrostatsku levitaciju potrebni ioni i ostale čestice kojih unutar vakuuma nema.

Ovim pokusom potvrđeno predviđanje 1.

### 4.3. Korona izboji u mraku i sile na tijelo

Kada oblik levitira u različitim sastavima ploča mijenjaju se korona izboji na vrhovima oblika. Različiti korona izboji prikazani su na slikama 24., 25., 26. i 27<sup>2</sup>.



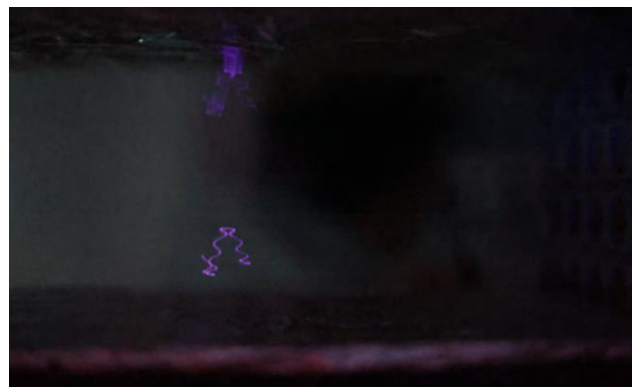
*Slika 24. NACA oblik 6 serije*



*Slika 25. NACA oblik 6 serije*



*Slika 26. NACA oblik 8 serije*



*Slika 27. NACA oblik 8 serije*

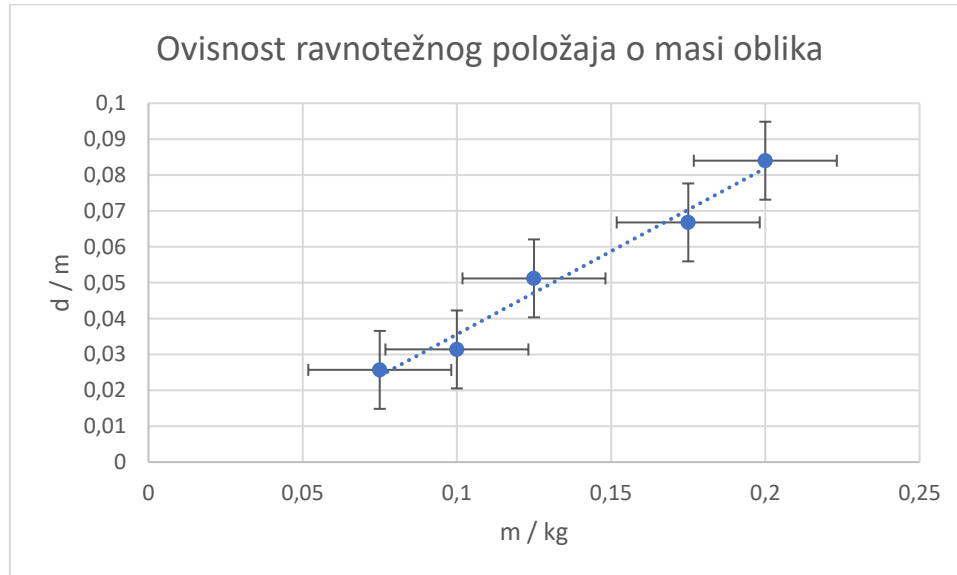
Ovim eksperimentom potvrđena su prvotne pretpostavke u predviđanju 2. i 3. Pozitivna korona je ljubičaste boje, a negativna korona plave boje. Kada je pozitivna korona na vrhovima oblika (tada je gornja ploča pozitivno nabijena, a donja negativno) sila prema dolje jednaka je sili prema gore kao što je i prikazano na slikama 24. i 25. Kada je negativna korona na vrhovima oblika (tada je gornja ploča negativno nabijena, a donja pozitivno) sila prema dolje jednaka je sili prema gore kao što je prikazano na slikama 26. i 27.

<sup>2</sup> U ovom pokusu korišteni su NACA oblici 6 i 8 serije jer oni najbolje levitiraju u određenim sastavima ploča.



#### 4.4. Ovisnost ravnotežnog položaja o masi oblika

Razlike kod ravnotežnih položaja ovisno o masi oblika – praćenje promjene ravnotežnog položaja ovisno o masi oblika može se prikazati pomoću grafa 1..



Graf 1. Ovisnost ravnotežnog položaja o masi oblika

Metodom najmanjih kvadrata<sup>3</sup> dobiva se:

$$a = 0,46 \quad b = -0,01 \quad M_a = 0,04 \quad M_b = 0,005$$

<sup>3</sup> Ako se radi o linearnoj ovisnosti  $y = ax + b$ , metodom najmanjih kvadrata određuju se parametri  $a$  i  $b$ . Za  $n$  parova točaka  $(x_i, y_i)$  koeficijenti  $a$  i  $b$  određuju se pomoću formula:

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

A nepouzdanosti tih koeficijenata određeni su s:

$$M_a = \sqrt{\frac{1}{n-2} \left( \frac{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} - a^2 \right)}$$

$$M_b = M_a \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}}$$

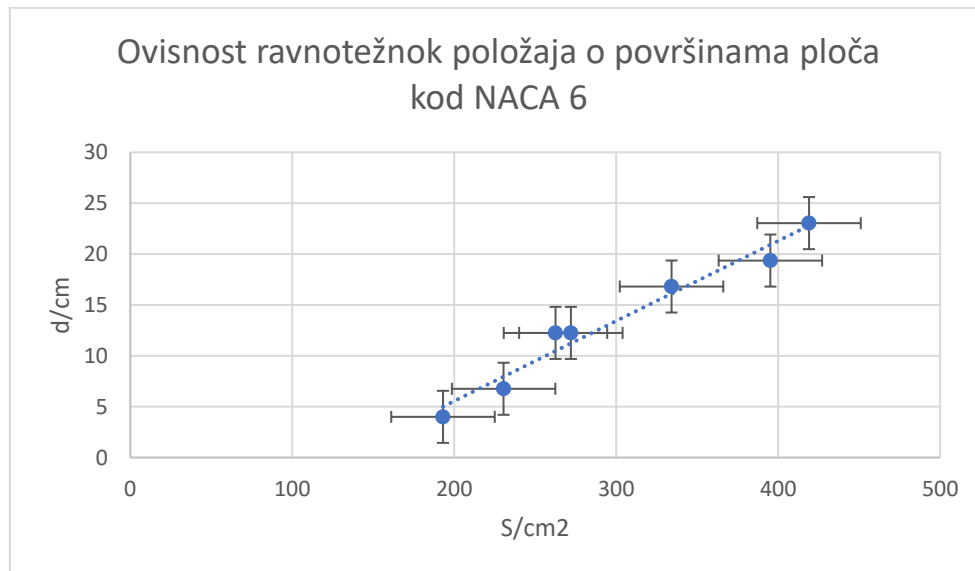
Na temelju grafa vidljivo je da je ovisnost ravnotežnog položaja oblika o njegovoj masi linearna, kao što se i pretpostavilo u četvrtoj hipotezi. Zamjećuje se kako je udaljenost od gornjeg vrha oblika do gornje ploče manji što je i manja masa oblika koji levitira, što povlači činjenicu da je oblik manje mase bliže gornjoj ploči, za razliku od oblika veće mase, odnosno sile na tijelo su jednake i izjednače se na toj udaljenosti. Isto tako pri većoj masi, veća je udaljenost između gornjeg dijela oblika i gornje ploče, pa je time i oblik dalje od gornje ploče, odnosno sile na tijelo se izjednače na toj udaljenosti.

Mjerenja potvrđuju predviđanje:

$$d = \frac{mg - B}{A} \quad (28)$$

#### 4.5. Ovisnost ravnotežnog položaja o površinama ploča

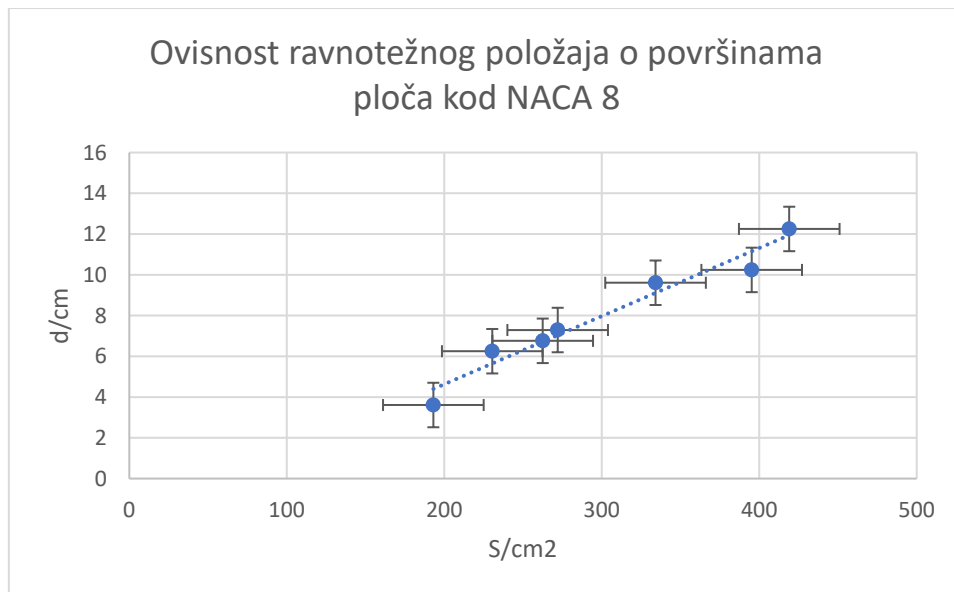
Razlike kod ravnotežnih položaja ovisno o površinama ploča – praćenje promjene ravnotežnog položaja ovisno o površinama ploča može se prikazati pomoću grafova 2., 3., 4. i 5.. Kako bi lakše odredili pogreške pri mjerenju, kvadrirati će se druga varijabla i pri tome će, prema predviđanjima, ovisnost biti linearna.



Graf 2. Ovisnost kvadrata ravnotežnog položaja o površinama ploča kod NACA 6

Metodom najmanjih kvadrata dobiva se:

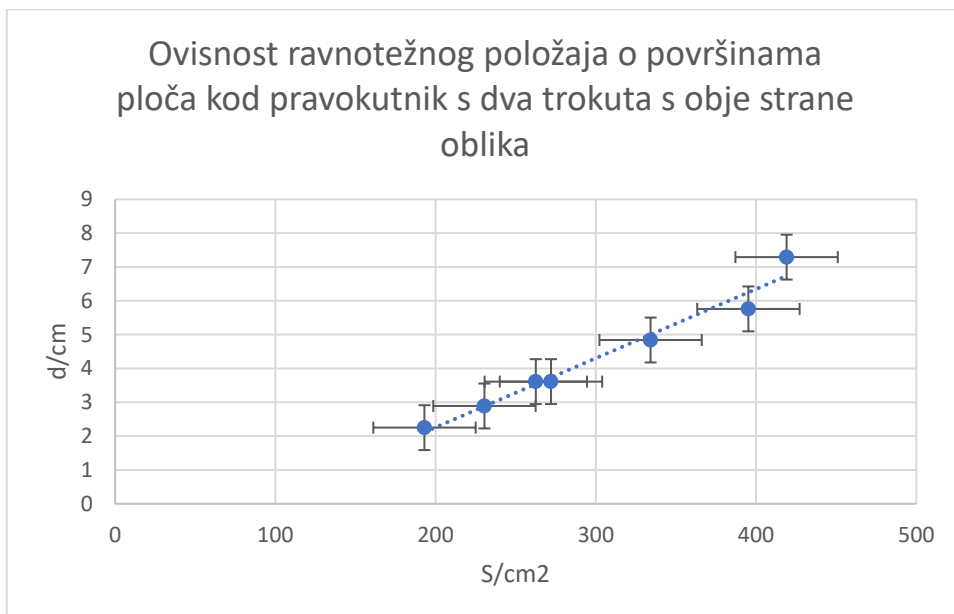
$$a = 0,27 \quad b = 3,25 \quad M_a = 0,03 \quad M_b = 0,26$$



Graf 3. Ovisnost kvadrata ravnotežnog položaja o površinama ploča kod NACA 8

Metodom najmanjih kvadrata dobiva se:

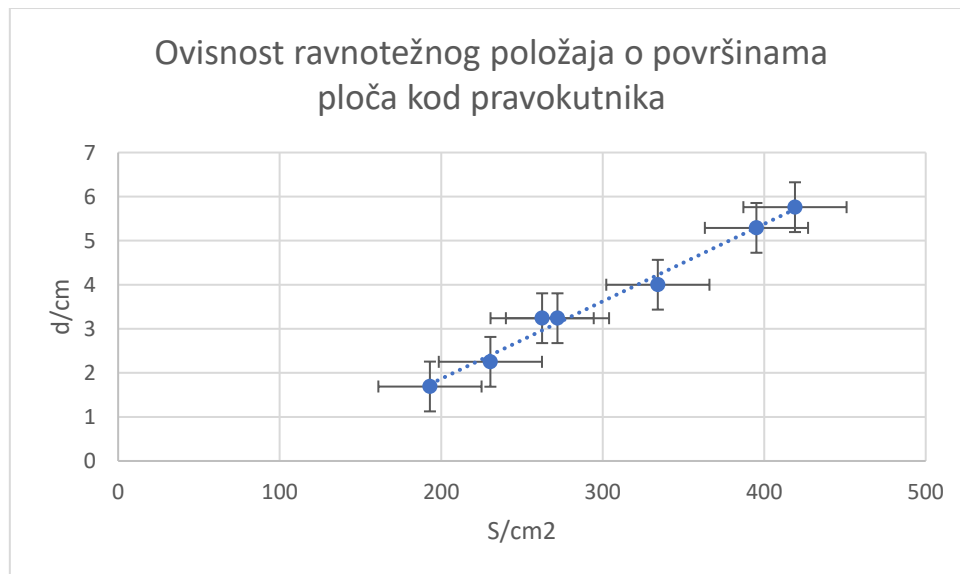
$$a = 0,19 \quad b = 1,62 \quad Ma = 0,02 \quad Mb = 0,15$$



Graf 4. Ovisnost kvadrata ravnotežnog položaja o površinama ploča kod pravokutnik s dva trokuta s obje strane oblika

Metodom najmanjih kvadrata dobiva se:

$$a = 0,23 \quad b = 1,29 \quad Ma = 0,02 \quad Mb = 0,16$$



Graf 5. Ovisnost kvadrata ravnotežnog položaja o površinama ploča kod pravokutnika

Metodom najmanjih kvadrata dobiva se:

$$a = 0,15 \quad b = 1,31 \quad M_a = 0,02 \quad M_b = 0,14$$

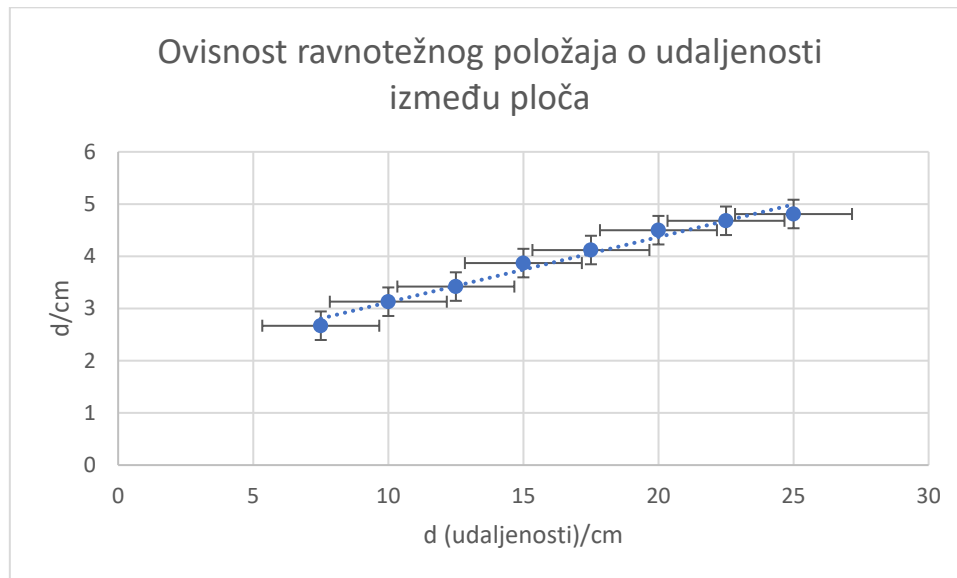
Ovim pokusom je potvrđeno predviđanje 5. Ravnotežni položaj i površina ploča su u linearnoj ovisnosti. Pri većoj površini veća je i udaljenost oblika od gornje ploče. Pri manjoj površini ploča manja je i udaljenost oblika od gornje ploče.

Mjerenja potvrđuju predviđanje:

$$d^2 = AS^2 - BS + C \quad (29)$$

#### 4.6. Ovisnost ravnotežnog položaja o udaljenosti između ploča

Razlike kod ravnotežnih položaja ovisno o udaljenosti između ploča – praćenje promjene ravnotežnog položaja ovisno o udaljenosti između ploča može se prikazati pomoću grafa 6..



Graf 6. Ovisnost ravnotežnog položaja o udaljenosti između ploča

Metodom najmanjih kvadrata dobiva se:

$$a = 0,12 \quad b = 1,87 \quad Ma = 0,01 \quad Mb = 0,13$$

Ovim pokusom je potvrđeno predviđanje 6. Ravnotežni položaj u linearnoj je ovisnosti s udaljenosti između ploča. Zaključuje se da je pri manjoj udaljenosti između ploča oblik manje udaljen od gornje ploče, a pri većoj udaljenosti da je oblik više udaljen od gornje ploče. Iznos struje bio je konstantan i iznosi je  $1,5 \mu A$ .

Mjerenja potvrđuju predviđanje:

$$d = \frac{A_1 l - A_1 h - mg}{A^1 + A^2} \quad (30)$$

#### 4.7. Ovisnost jakosti struje o obliku

Razlike kod iznosa struje ovisno o obliku – praćenje promjene iznosa struje ovisno o obliku može se prikazati pomoću tablice 1. i 2..

	I (pravokutnik)/ $\mu A$	I (pravokutnik s dva trokuta s obje strane oblika) / $\mu A$	I(NACA 6) / $\mu A$	I (NACA 8) / $\mu A$
Mjerenje 1.	4,7	2,1	3,8	3,9
Mjerenje 2.	4,3	2,6	3,6	4,1
Mjerenje 3.	4,5	2,7	3,7	3,6
Mjerenje 4.	4,2	2,4	3,4	3,9
Mjerenje 5.	4,1	2,4	3,6	4,0
Aritmetička sredina	4,36	2,44	3,62	3,9

Tablica 1. Iznosi struje kod različitih oblika pri smjeru struje od + prema -

	I (pravokutnik)/ $\mu A$	I (pravokutnik s dva trokuta s obje strane oblika) / $\mu A$	I(NACA 6) / $\mu A$	I (NACA 8) / $\mu A$
Mjerenje 1.	-2,9	-1,6	-3,1	-2,8
Mjerenje 2.	-2,6	-1,3	-2,9	-3,0
Mjerenje 3.	-2,8	-1,8	-3,0	-3,3
Mjerenje 4.	-2,7	-2,0	-2,9	-3,2
Mjerenje 5.	-2,6	-2,0	-3,0	-3,3
Aritmetička sredina	-2,72	-1,74	-2,98	-3,12

Tablica 2. Iznosi struje kod različitih oblika pri smjeru struje od - prema +

Prema izmjerenim podacima vidljivo je kako iznos struje ovisi o obliku koji tada levitira u sustavu. Time se potvrdilo predviđanje 7. gdje je opisano kako iznos struje ovisi o koeficijentu prilagodbe koji ovisi o geometriji oblika. Također, iznosi struje pri smjeru od – prema + manji su od iznosa od + prema – kao što je vidljivo u gornjim tablicama.

Iz provedene analize podataka potvrđuje se predviđanje 7. iznos struje u sustavu ovisi o obliku koji za to vrijeme levitira.

#### 4.8. Levitacija između dvije ruke

Oblik može levitirati i kada je čovjek dio cijelog postava, odnosno kada dlan čovjeka zamijeni kondenzatore (metalne ploče). Slika 28. prikazuje levitaciju NACA oblika 8 serije između dva različita dlana.



*Slika 28. Levitacija između dvije ruke*

Ovim pokusom je dokazano kako i čovjek može biti dio postava za levitaciju i kako je moguće postići levitaciju samo ako u eksperimentu sudjeluju dvije osobe kako bi svaki dlan mogao biti drugačije nabijen.

Analogno tome moguća je i levitacija kada je u postavu samo jedan dlan osobe npr. gornja ploča i klasična donja metalna ploča, kao što je prikazano na slici 29.



*Slika 29. Levitacija kada je samo jedna osoba u postavu*



#### 4.9. Diskusija

Teorijska očekivanja uglavnom se podudaraju s rezultatima dobivenim analizom podataka. Sva predviđanja iz teorijskog dijela rada podudaraju se s izmjerenim podacima. Potvrđena je pretpostavka da levitacija nije moguća u vakuumu, pozitivna korona je ljubičaste boje, a negativna korona plave, pri +/- postavu levitiraju oblici koji su s gornje strane većeg polumjera zakrivljenosti, a pri postavu -/+ oni koji su s gornje strane oštri, linearna ovisnost mase i ravnotežnog položaja, linearna ovisnost ravnotežnog položaja o udaljenosti između ploča, ovisnost iznosa struje o obliku koji levitira u sustavu i ovisnost površina ploča i ravnotežnog položaja. Dokazano je i kako čovjek može biti dio postava za elektrostatsku levitaciju. Svim navedenim potvrđena je osnovna pretpostavka da oblici u ovom eksperimentu, kao i lifter, levitiraju zbog EHD – a. Predviđanja na temelju grafa i tablica uglavnom se podudaraju s analiziranim rezultatima mjerenja.

## 5. Zaključak

U ovome eksperimentalnom radu proučena je ovisnost relevantnih parametara koji utječu na samu levitaciju. Proučeni su različiti oblici koji levitiraju, te njihove karakteristike.

U teorijskom dijelu razjašnjeni su oblici koji levitiraju u sustavu. Zatim je postavljeno sedam predviđanja koji razmatraju ovisnost nekih od karakteristika oblika pri levitaciji o relevantnim parametrima. Razjašnjena je formula za sile prilikom levitacije i formula za ovisnost ravnotežnog položaja o površinama ploča, o udaljenosti između ploča i o masi, te formula za silu između elektroda.

U eksperimentalnom dijelu provedena je analiza karakteristika oblika pri levitaciji o relevantnim parametrima: nemogućnost levitacije u vakuumu, korona izboji, levitacija oblika ovisno o postavu ploča, ravnotežni položaj oblika i masa oblika, ravnotežni položaj i površina ploča, ravnotežni položaj i udaljenosti između ploča, te iznos struje pri različitim oblicima koji levitiraju. Dokazano je i kako čovjek može biti dio postava za elektrostatsku levitaciju. Analizirani rezultati bili su gotovo jednaki kao i predviđanja u teorijskom dijelu rada. Također, u eksperimentalnom dijelu razjašnjen je postupak izvedbe mjerenja i metoda najmanjih kvadrata. Određeni su i glavni parametri u radu.

## 6. Literatura

- [1] Vaddi R.S., Guan Y., Mamishev A., Novosselov I. (2020.) *Analytical Model for Electrohydrodynamic Thrust* URL: <https://scihub.se/https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rspa.2020.0220> (2023-2-9)
- [2] Kittel C., Knight W. D., Ruderman M. A. (1982.) *Elektromagnetizam*. Zagreb: Udžbenik fizike Sveučilišta u Berkeleyu
- [3] Mott NF. (1948.) *Electronic processes in ionic crystals (ed. RW Gurney)*: 2nd edn. Oxford, UK: Clarendon Press (2023-2-13)
- [4] Townsend JSXI. (1914.) *The potentials required to maintain currents between coaxial cylinders* Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci. 28, 83-90 (2023-2-15)
- [5] Thomas B. Bahder and Christian Fazi (2003.) *Force on an Asymmetric Capacitor* (2023-2-15)
- [6] Eric Moreau, Pierre Audier, Nicolas Benard (2018), *Ionic wind produced by positive and negative corona discharges in air* Journal of Electrostatics (2023-2-25)
- [7] Cattani M., Vannucci A., Souza V. G. (2015) *Lifter – High voltage plasma levitation device*, URL: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/PGZTkjQHXMxNZn7cHVKbKKBG/?lang=en> (2023-3-8)
- [8] Masuyama K., Steven R. H. Barrett (2013) *On the performance of electrohydrodynamic propulsion* Cambridge, USA (2023-3-8)
- [9] Feynman R. (1963-2013) *The Feynman lectures on physics*, California Institute of Technology, URL: <https://www.feynmanlectures.caltech.edu/> (2023-4-4)
- [10] Žugec P. *Obrada rezultata mjerenja* PMF, URL: [http://www.phy.pmf.unizg.hr/~pzugec/FP/obrada\\_rezultata.pdf](http://www.phy.pmf.unizg.hr/~pzugec/FP/obrada_rezultata.pdf) (2023-4-4)