

Coulombov zakon prikazan pomoću proširene stvarnosti

Zahtila, Karla

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:787604>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Karla Zahtila

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, srpanj 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Karla Zahtila

COULOMBOV ZAKON PRIKAZAN POMOĆU PROŠIRENE STVARNOSTI

ZAVRŠNI RAD

Mentor: doc. dr. sc. Iva Movre Šapić

Članovi ispitnog povjerenstva:

doc. dr. sc. Iva Movre Šapić

dr. sc. Andrej Vidak

doc. dr. sc. Vesna Očelić Bulatović

Zagreb, srpanj 2023.

SAŽETAK

Iz svakodnevnog života poznato je da se djelovanje između dva nabijena tijela odvija bez vidljivog posrednika (npr. ako se balon trlja po kosi, početak će privlačiti vlasi, na isti način natrljani komad stakla privlačit će vunu itd.), prva takva zapažanja zabilježena su 600 godina prije nove ere. Ono što se tada nije znalo, a danas je poznato, je da se takva djelovanja pripisuju postojanju dvaju električnih naboja koji su nazvani pozitivnim i negativnim. Također je poznato da se istoimeni naboji odbijaju, a raznoimeni privlače.

U popunjenom atomu svakog elementa broj pozitivnih i negativnih naboja je jednak, a između njih djeluju električne sile. Tijelo je električki neutralno kada su svi atomi popunjeni elektronima, tada izvan atoma nema električnog djelovanja. Pri određenim uvjetima neki elektroni iz valentne ljuske atoma mogu se odvojiti i smjestiti se u prazni prostor između ostalih atoma. To se odvija i tijekom, već spomenutog, trljanja staklenog štapa vunom, točnije, s površine stakla neki se elektroni istrgnu i ostanu na vuni. Na taj način stakleni štاپ postaje pozitivno naelektriziran, jer ima višak pozitivnog naboja, a vuna negativno naelektrizirana, jer ima višak otrgnutih elektrona. Višak pozitivnog naboja na štapi miruje kao i višak negativnog naboja na vuni. Tako stvoreni višak naboja zove se statički naboj, a grana fizike koja se bavi proučavanjem pojava između električki nabijenih čestica, elektrostatika.

Prva kvantitativna istraživanja između dvaju naelektriziranih tijela proveo je Charles de Coulomb, eksperimentalno na torzijskoj vagi. Te je došao do zaključka, danas poznatog kao Coulombov zakon, koji glasi: „Dva se mirna električna naboja odbijaju ili privlače silom koja je razmjerna umnošku njihovih naboja, a obrnuto je razmjerna kvadratu njihove udaljenosti.“

Obzirom da je izvedba torzijske vage vrlo zahtjevna i teško izvediva u učionicama, što se odnosi i na mnoge druge eksperimente koji su tijekom povijesti provedeni u svrhu otkrivanja raznih fizikalnih zakona, u nastavi se koriste isključivo matematička objašnjenja. Takav način predavanja, ali i učenja je vrlo nezahvalan zbog nemogućnosti vizualizacije često apstraktnih pojmova. U svrhu boljeg razumijevanja, ali i potencijalno veće zainteresiranosti učenika i studenata za gradivo fizike, sve se više uvode aplikacije koje koriste tehnologije poput proširene stvarnosti. Takva je i aplikacija CoulombsLawAR. Vrednovanje njene korisnosti, koje je karakteristično za aplikacije te vrste, provedeno je među studentima prve godine prijediplomskog studija Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije u obliku ankete koja se sastojala od četiri dijela (SUS, HARUS, UX upitnici te otvorena pitanja), a dobiveni rezultati pokazuju zadovoljstvo ispitanika. Sveukupan dojam je pozitivan, aplikacija je pomogla studentima u razumijevanju gradiva, no potrebno je ukloniti neke tehničke poteškoće.

Ključne riječi: električni naboj, elektrostatika, Coulombov zakon, proširena stvarnost, CoulombsLawAR

ABSTRACT

It is known from everyday life that the action between two charged bodies takes place without a visible intermediary (e.g. if a balloon is rubbed on the hair, it will begin to attract hairs, in the same way a rubbed piece of glass will attract wool, etc.), the first such observations were recorded in 600 years BC. What was not known then, and is known today, is that such actions are attributed to the existence of two electric charges, which are called positive and negative. It is also known that charges of the same name repel, and charges of different names attract.

In a filled atom of each element, the number of positive and negative charges is equal and electric forces act between them. A body is electrically neutral when all atoms are filled with electrons and then there is no electrical activity outside the atoms. Under certain conditions, some electrons from the valence shell of an atom can be separated and placed in the empty space between other atoms. This also takes place during the already mentioned rubbing of the glass rod with wool, more precisely; some electrons remain on the wool after being torn off the surface of the glass. In this way, the glass rod becomes positively electrified, because it has an excess of positive charge, and the wool becomes negatively electrified, because it has an excess of torn electrons. The excess positive charge on the stick is at rest, as is the excess negative charge on the wool. The excess charge thus created is called static charge, and the branch of physics that deals with the study of phenomena between electrically charged particles is called electrostatics.

Charles de Coulomb conducted the first quantitative research between two electrified bodies, experimentally on a torsion balance. He concluded that two stationary electric charges repel or attract each other with a force proportional to the product of their charges, and inversely proportional to the square of their distance – Coulomb's Law.

Given that, the execution of the torsion balance is very demanding and difficult to perform in classrooms, which also applies to many other experiments that have been conducted throughout history for discovering various physical laws, that is the reason why in classes professors are using only mathematical explanations. This way of teaching and learning is very ungrateful due to the impossibility of visualizing often-abstract concepts. For the purpose of better understanding, but also potentially greater interest of pupils and students in physics material, more and more applications that use technologies such as augmented reality, are being introduced. Such is the application of CoulombsLawAR. The evaluation of its usability, which is characteristic for applications of this type, was carried out among first-year undergraduate students of the Faculty of Chemical Engineering and Technology in the form of a survey consisting of four parts (SUS, HARUS, UX questionnaires and open-ended questions). The obtained results show the satisfaction of the respondents. The overall impression is positive, the application helped students in understanding the material, but some technical difficulties need to be removed.

Key words: electric charge, electrostatics, Coulomb's law, augmented reality, CoulombsLawAR

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ELEKTROSTATIKA	2
2.1 Električni naboj	2
2.1.1 Pravilo očuvanja naboja	3
2.1.2 Kvantizacija naboja	3
2.2 Coulombov zakon.....	3
2.2.1 Električno polje	5
2.3 Dokazi Coulombovog zakona kroz povijest	5
3. PROŠIRENA STVARNOST	8
3.1 Općenito	8
3.2 Primjena proširene stvarnosti u nastavi	8
3.3 CoulombsLawAR aplikacija	9
4. VREDNOVANJE UPOTREBLJIVOSTI.....	12
4.1 SUS upitnik	12
4.1.1 Isključivo pozitivan SUS upitnik	13
4.2 HARUS upitnik	14
4.3 UX upitnik.....	15
5. EKSPERIMENTALNI DIO	16
6. REZULTATI I RASPRAVA.....	18
6.1 Likertova ljestvica	18
6.2 Otvorena pitanja	20
7. ZAKLJUČAK.....	24
LITERATURA	25

1. UVOD

U 7. stoljeću prije nove ere započelo je proučavanje električnih pojava i to spoznajom da jantara, natrljan tkaninom, privlači druge lagane predmete. Prvi koji je to uočio bio je Tales iz Mileta (624. – 546.), grčki filozof i matematičar. Zaključio je da se tijela trljanjem mogu naelektrizirati¹, tj. električki nabiti. Potkraj 16. stoljeća, u knjizi *De Magnete*, engleski je liječnik William Gilbert (1544. – 1603.) iznio svoja istraživanja iz elektrostatike i magnetostatike nakon proučavanja naelektriziranog jantara i drugih tvari. U 18. stoljeću naboji su okarakterizirani kao pozitivni i negativni. Benjamin Franklin (1706. – 1790.), američki učenjak, naboj proizveden na jantaru nazvao je negativnim, a naboj nastao trljanjem stakla pozitivnim. U istom je stoljeću francuski fizičar, Charles de Coulomb (1736. – 1806.), izmjerio silu između dva naboja i pronašao temeljni zakon elektrostatike, koji je i tema ovoga rada. Sve pojave do kojih su tadašnji učenjaci i fizičari došli, danas imaju svoje objašnjenje. Tvari su sastavljene od atoma, a atomi od pozitivno nabijene jezgre, u kojoj su smješteni pozitivno nabijeni protoni i neutralni neutroni, i negativno nabijenog elektronskog omotača. Sve nabijene elementarne čestice imaju naboj jednak po iznosu, pozitivan ili negativan. Takav se naboj naziva elementarnim, e , i iznosi $1,602 \times 10^{-19}$ C.

Davno se primijetilo da se istoimeni električni naboji odbijaju, a raznoimeni privlače. Silu između dviju nabijenih kuglica prvi je izmjerio, već spomenuti, Charles de Coulomb (1785.), učinio je to pomoću torzijske vage, kasnije nazvane Coulombovom vagom. Na temelju svojih mjerenja zaključio je da je sila između dvaju točkastih naboja proporcionalna umnošku njihovih naboja, a obrnuto proporcionalna kvadratu njihove udaljenosti. [1]

Proširena stvarnost (*AR – augmented reality*) prvi put se javlja 1965. godine, a njen koncept su osmislili Ivan Sutherland i njegovi studenti na Harvardu. U narednim se desetljećima tehnologija razvijala u mnogim laboratorijima, privatnim tvrtkama, ali i državnim agencijama. Prvi razvijeni sustavi koristili su se za avijaciju te vojne i industrijske potrebe. Od tehnologije proširene stvarnosti se očekuje da kreira pozitivne promjene u više industrija, uključujući maloprodaju, logistiku, zdravstvo, obranu i proizvodnju. [2] Osim navedenog, zbog svoje je praktičnosti, primjenjiva i u obrazovanju. Ponajviše zbog dostupnosti kroz aplikacije na mobilnim uređajima.

S obzirom da je u učionicama vrlo zahtjevno provesti eksperiment kakav je Coulomb proveo kako bi došao do zakonitosti po kojoj je poznat, vrlo je važno osmisliti načine na koje bi se Coulombov zakon približio učenicima, ali i studentima. Virtualni laboratoriji u nastavi fizike uzeli su sve veći zamah zbog mogućnosti da se u učionicama provedu pokusi koji su vrlo zahtjevni za izvedbu. Takav pristup i nove tehnologije omogućavaju da učenje o fizikalnim zakonitostima u nastavi ne ostane isključivo na matematičkom objašnjenju. Iz tog je razloga i s istim ciljem razvijena aplikacija *CoulombsLawAR*.

¹ Izvedeno iz grčke riječi za jantara

2. ELEKTROSTATIKA

Elektromagnetska međudjelovanja uključuju čestice koje imaju električni naboj, svojstvo važno poput mase. Kako su čestice koje imaju neku masu pod djelovanjem gravitacijske sile, tako su čestice koje imaju električni naboj pod djelovanjem električnih sila. Proučavanje elektromagnetizma temelji se na ispitivanju prirode električnog naboja. Električni naboj je kvantiziran i podliježe pravilu očuvanja. Kada su naboji u mirovanju, među njima djeluju elektrostatske sile. Te su sile od velike važnosti u kemiji i biologiji te imaju mnoge tehnološke primjene. Djelovanje elektrostatskih sila definirano je Coulombovim zakonom. [3] Iz svega navedenog može se reći da je elektrostatika grana fizike koja se bavi proučavanjem električnih polja, pojava i sila koje se javljaju među električki nabijenim česticama u mirovanju.

2.1 Električni naboj

Osnovno svojstvo električnog naboja je njegovo postojanje u dva oblika, pozitivnom i negativnom. Ono što danas smatramo negativnim električnim nabojem moglo se smatrati i pozitivnim. U naboju elektrona ne postoji ništa što bi ga činilo negativnim, nije poput negativnog cijelog broja koji je definiran množenjem i razlikuje se od pozitivnog cijelog broja po tome što kvadriranjem daje cijeli broj suprotnog predznaka. Umnožak dvaju naboja ne daje novi naboj stoga tu nema usporedbe.

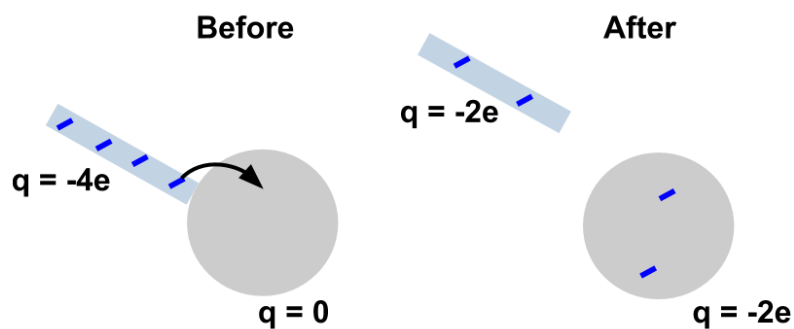
Sve nabijene čestice mogu biti podijeljene u dvije skupine, pritom se čestice iz iste skupine međusobno odbijaju, a iz različitih skupina se privlače. Ako se dvije male električki nabijene čestice A i B, koje se nalaze na nekoj udaljenosti jedna od druge, međusobno privlače, a pritom čestica A privlači i neku treću električki nabijenu česticu C, onda će se čestice B i C međusobno odbijati. Pozitivan i negativan naboj mogu se smatrati suprotnim manifestacijama jednog svojstva. [4]

Kada je ukupan broj pozitivnih naboja u nekom makroskopskom tijelu jednak broju negativnih naboja, ukupan naboj je nula i ono je električki neutralno. Da bi neko makroskopsko tijelo postalo negativno nabijeno potrebno je njegovom neutralnom obliku dodati negativan naboj ili oduzeti pozitivan. Na isti način nastaje i električki pozitivno nabijeno makroskopsko tijelo, dodavanjem pozitivnog naboja ili oduzimanjem negativnog. U većini slučajeva negativno nabijene čestice su te koje se dodaju ili oduzimaju, a „pozitivno nabijeno tijelo“ gubi svoj uobičajeni komplement elektrona. Svaki atom građen je od tri vrste čestica: negativno nabijeni elektroni, pozitivno nabijeni protoni i neutralni neutroni. Protoni i neutroni čine jezgru oko koje se nalaze elektroni. Između negativno nabijenih elektrona i pozitivno nabijenih protona djeluju privlačne električne sile koje omogućavaju da se elektroni drže uz jezgru. [3]

Postoje još dva osnovna principa u električnoj građi tvari: električni naboj je kvantiziran i očuvan. Oba svojstva uključuju količinu naboja te stoga impliciraju njegovo mjerenje. Pomoću njih moguće je definirati mjerenje naboja u smislu djelovanja sile između električnih naboja na nekoj udaljenosti.

2.1.1 Pravilo očuvanja naboja

Kada je određena količina naboja stvorena na jednom predmetu, na drugom će se predmetu stvoriti ista količina suprotnog naboja. Tijekom svih procesa ukupna količina izmijenjenog naboja jednaka je nuli. Na primjer, kada se plastično ravnalo protrlja o papirnati ručnik plastika će imati čestice negativnog naboja, a papir istu količinu čestica pozitivnog naboja. Drugim riječima, električni naboj ne može nestati ili nastati već samo prelaziti s jednog tijela na drugo (slika 1.). [5]



Slika 1. Prikaz zakona očuvanja naboja [6]

2.1.2 Kvantizacija naboja

Električni naboji koji se nalaze u prirodi obilježavaju se u jedinici magnitude koja je jednaka količini naboja jednog elektrona. Ta se magnituda naboja označava slovom e . Nadalje, naboj tijela, q , dan je izrazom

$$q = \pm ne \quad (1)$$

gdje je n cijeli broji, pozitivan ili negativan. Elementarni naboj, e iznosi $1,602 \times 10^{-16}$ C i označava naboj jednog elektrona. Naboj tijela jednak je integralnom umnošku elementarnog naboja i nikada ne može biti proizvoljna vrijednost. To se svojstvo naziva kvantizacija električnog naboja.

2.2 Coulombov zakon

Charles Augustin de Coulomb (1736. – 1806.) proučavao je međudjelovanja sile između nabijenih čestica (slika 2.). Zamislio je točkaste naboje kao male metalne kuglice koje sadrže određenu količinu naboja. Kuglice su tijela koja se koriste kada se želi smanjiti utjecaj geometrijskog oblika na promatranu silu, a metali su vodiči i po njima se naboji lako gibaju, odnosno ako se jedna nabijena metalna kuglica sudari s nenabijenom metalnom kuglicom, nakon njihovog dodira obje će sadržavati jednaku količinu naboja. S obzirom na tu spoznaju,

kao i na činjenicu da se istovrsni naboji odbijaju, jasno je da će se naboji jednoliko raspodijeliti po dvjema geometrijski jednakim metalnim kuglicama nakon njihovog sudara. Coulomb je iskoristio četiri takve kuglice, dvije je postavio na torzijsku vagu, a dvije ostavio slobodne. Primičući slobodne kuglice onima na vagi mjerio je silu kojom jedna kuglica djeluje na drugu istog naboja. Ustanovio je da je električna sila između kuglica obrnuto proporcionalna njihovom kvadratu udaljenosti, a proporcionalna količini naboja na njima. [7] Time je opisao ono što se danas naziva Coulombovim zakonom: jakost električne sile između dvije nabijene čestice proporcionalna je umnošku njihovih naboja i obrnuto proporcionalna kvadratu njihove udaljenosti. Matematički se opisuje kao:

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (2)$$

gdje je k Coulombova konstanta čija numerička vrijednost ovisi o sustavu mjernih jedinica koji se koristi, q_1 i q_2 su magnitude električkih naboja, a r je udaljenost među njima. Koristeći SI sustav mjernih jedinica [8], konstanta k se češće piše kao:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (3)$$

gdje ϵ_0 označava električnu permitivnost vakuuma i iznosi

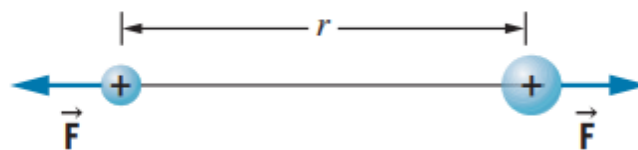
$$\epsilon_0 = 8,8541878128(13) \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$$

Iz čega proizlazi vrijednost konstante k

$$k = 8,9875517923(14) \times 10^9 \text{ kg m}^3 / \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$$

Radi pojednostavljenja za numeričku vrijednost konstante k uzima se

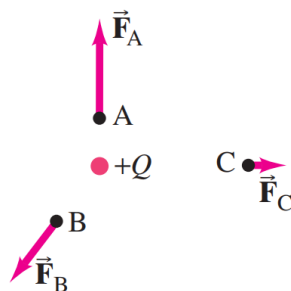
$$k = 8,988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \text{ ili čak } k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$



Slika 2. Dvije električki nabijene čestice djeluju jedna na drugu silama jednakih iznosa i suprotnih predznaka duž pravca koji spaja nabijene čestice. Ako su naboji istog predznaka sila je odbojna, a ako su suprotnih predznaka sila je privlačna. [9]

2.2.1 Električno polje

Mnoge sile se javljaju tijekom međusobnog dodira dvaju tijela dok gravitacijska i električna sila djeluju na nekoj udaljenosti, javljaju se kada tijela nisu u neposrednom kontaktu. Iz tog se razloga uvodi pojam polja. Svaka električki nabijena čestica oko sebe stvara električno polje kojim djeluje na druge čestice u svojoj blizini. Električno polje može se objasniti mjerenjem sila na mali pozitivan probni naboj, q . Ako se taj probni naboj nalazi na raznim mjestima u blizini nekog pozitivnog naboja, Q , sila koja djeluje na q izgleda kao što je prikazano na slici 3. Sila u točki B je manja nego ona u točki A jer je udaljenost točke B od naboja Q veća. U svim slučajevima sila na probni naboj, q je usmjerena od naboja Q .



Slika 3. Sila pod djelovanjem naboja $+Q$ na probni naboj, q u točkama A, B i C

Električno polje definirano je u smislu sile na pozitivan probni naboj. Dakle, električno polje, E , je definirano kao omjer električne sile, F , na probni naboj, q , i probnog naboja.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (4)$$

Jakost električnog polja može se mjeriti u bilo kojoj točki.

$$E = \frac{kqQ}{r^2q}, \text{ tj. } E = k \frac{Q}{r^2} \quad (5)$$

Jakost električnog polja, E ovisi samo o naboju Q , a ne o probnom naboju q . Ako je q pozitivan, E i F su usmjereni u istom smjeru, a ako je q negativan u suprotnom. [5]

2.3 Dokazi Coulombovog zakona kroz povijest

Kao što je već i poznato Coulomb se zanimao za međudjelovanja električnih naboja, a ta je tema bila proučavana i ranije od strane Priestleya i Franklina u 50-im godinama 18. stoljeća. Franklin (1706. - 1790.) je postavio malu plutenu kuglu u električki nabijenu metalnu posudu i zapazio da se kuglica nije pomaknula. Taj je fenomen objasnio Priestley 1767. tako što je Franklinovu posudu zamislio kao sferičnu ljusku i povukao paralelu s Newtonovim zakonom gravitacije te zaključio da električna sila, isto kao i gravitacijska, ovisi o udaljenost u smislu r^{-2} . Godine 1759. Aepinus (1724. – 1802.) napisao je teorijski esej o postojanju dviju vrsta

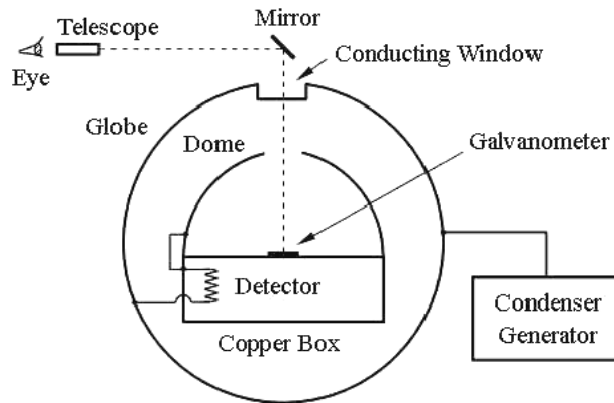
električki nabijenih čestica (pozitivne i negativne) te o $1/r^2$ ovisnosti električne sile. Robinson (1739. – 1805.) je mjerio odbojnu silu između dvije nabijene kuglice uravnotežene djelovanjem gravitacijske sile. Poznavajući njihovu masu i ponavljajući mjerenje na različitim udaljenostima, izračunao je električnu silu te potvrdio točnost ovisnosti $1/r^2$.

$$F \propto \frac{1}{r^{2 \mp \varepsilon}} \quad (6)$$

ε – mjera preciznosti do koje je vrijednost $1/r^2$ provjerena

Potaknut ranijim otkrićima, istom problematikom bavio se i Cavendish. Svoj je eksperiment proveo koristeći metalnu sferičnu ljusku zatvorenu unutar vanjske ljuske sastavljene od dvije polutke koje su se mogle otvarati i zatvarati. U zatvorenom položaju te su polutke bile električno spojene na elektrostatički uređaj i ohmski s unutarnjom sferom. Zatim se vanjska sfera odvojila od unutarnje, a polutke su se otvorile i pritom ostale električki nabijene. Time je potvrđena $1/r^2$ ovisnost električne sile o udaljenosti i to s manjom nesigurnošću od Robinsonove. Cavendish je dobio vrijednost $\varepsilon \leq 0,03$. Poboljšanu verziju ovog pokusa izveo je Maxwell. Povećao je preciznost i utvrdio da se eksponent udaljenosti ne mijenja od 2 za više od $\varepsilon \cong 5 \times 10^{-5}$. [10]

U 20. stoljeću započelo se i s dinamičkim eksperimentima kako bi se dobila bolja preciznost. Tehnologija koja se koristila zahtijevala je veliku izmjeničnu struju primijenjenu na vanjsku sferu te fazno osjetljive uređaje za otkrivanje relativne razlike potencijala između dviju ljuski. Također, uključuje se i vjerojatnost da masa mirovanja fotona nije nula. Prvi takav eksperiment proveli su Plimpton i Lawton 1936. Cavendishev i Maxwellov elektrostatički eksperiment s koncentričnim metalnim kuglama zamijenili su kvazistatičnom metodom, a poteškoće uslijed spontane ionizacije i kontaktnih potencijala riješili su postavljanjem detektora, koji je stalno spojen kako bi mogao detektirati svaku promjenu potencijala, unutar unutarnje sfere (slika 4.). Detektor je korišten kao rezonantni elektrometar s frekvencijom od oko 2 Hz što je poboljšalo osjetljivost i smanjilo induktivni efekt zbog otvaranja i zatvaranja krugova primijenjenog napona na vanjskoj kugli. Kao posljedica razlike potencijala, induciranog naponom na vanjsku kuglu, između dvije kugle, svaka rezonancija mogla se promatrati kroz provodni prozor, na vrhu vanjske kugle, uz pomoć zrcala i teleskopa. Provodni prozor je zapravo posuda sa staklenim dnom u površini vanjske sfere, a slovi za najvažniji dio eksperimenta i autori tvrde da je u njemu ključ uspjeha. Sadržavao je otopinu soli u vodi sa svojom površinom u ravnini površine vanjske kugle u kojemu je disk od fine žičane gaze koji pokriva staklo, postavljen na navojni rub posude i služio je za osiguravanje odlične vodljivosti. Na vanjsku sferu primijenjen je izmjeničan visok potencijal od oko 3000 V generiran posebno dizajniranim kondenzatorom koji je radio na niskim rezonantnim frekvencijama galvanometra. Provedeni su testovi da se otkrije promjena potencijala kupole u odnosu na vanjsku sferu koji su pokazali da se ne može detektirati nikakva promjena prilikom malog toplinskog gibanja galvanometra, za osjetljivost detektora do $1 \mu\text{V}$. Kugle su bile promjera 760 i 610 mm. Dobili su da je odstupanje eksponenta udaljenosti od $2 \varepsilon < 2 \times 10^{-9}$, a granica mase mirovanja fotona $m_\nu < 3,4 \times 10^{-44}$. [11]



Slika 4. Shematski prikaz eksperimenta Plimptona i Lawtona [11]

Nakon njihovog provelo se još sličnih pokusa sa sve manjim odstupanjima i sve većom preciznošću.

Tablica 1. Rezultati eksperimentalnih dokaza Coulombova zakona [11]

Author (date)	Experimental scheme	Deviation of q
Robison (1769)	Gravitational torque on a pivot arm	6×10^{-2}
Cavendish (1773)	Two concentric metal spheres	2×10^{-2}
Coulomb (1785)	Torsion balance	4×10^{-2}
Maxwell (1873)	Two concentric spheres	5×10^{-5}
Plimpton and Lawton (1936)	Two concentric spheres	2×10^{-9}
Cochran and Franken (1967)	Concentric cubical conductors	9.2×10^{-12}
Bartlett <i>et al</i> (1970)	Five concentric spheres	1.3×10^{-13}
Williams <i>et al</i> (1971)	Five concentric icosahedra	$(2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$
Fulcher (1985)	Improved on Williams' experiment	$(1.0 \pm 1.2) \times 10^{-16}$
Crandall <i>et al</i> (1983)	Three concentric icosahedra	6×10^{-17}
Ryan <i>et al</i> (1985)	Cryogenic experiment	

3. PROŠIRENA STVARNOST

3.1 Općenito

Proširena stvarnost (AR) je tehnologija koja omogućava postavljanje virtualnih objekata u stvarni prostor na način da se virtualni objekti nalaze na istom mjestu u prostoru s onima koji nas zapravo okružuju. Takva tehnologija prvi je put predstavljena u zrakoplovstvu 1990-ih godina. Danas, ta ista tehnologija ima široku primjenu u nastavi i istraživanjima, a razlog tomu je što više ne zahtijeva skupe uređaje i sofisticiranu opremu, već se može koristiti na računalima i mobilnim uređajima. [12]

Kao što je već i spomenuto, proširena stvarnost povezuje virtualne resurse sa stvarnim fizičkim elementima i omogućava korisniku da ih vidi istovremeno. Kako bi se ostvarilo bolje razumijevanje načina rada proširene stvarnosti, pogodno ju je usporediti s virtualnom (VR). Virtualna stvarnost omogućava korisniku da osjeti računalno generirano 3D okruženje, ali istovremeno potpuno isključuje doticaj korisnika sa stvarnim prostorom u kojem se nalazi. Cilj aplikacija koje koriste tehnologiju proširene stvarnosti je upravo povezivanja tih dvaju područja – virtualnog i stvarnog. [13] Te aplikacije mogu raditi na temelju: markera (za aktivaciju AR sadržaja potrebni su kamera i određeni tiskani markeri), lokacije (AR tehnologija koristi informacije o geografskim koordinatama mjesta na kojemu se korisnik nalazi) i pokreta (promjena položaja pokreće AR sadržaj), ali postoje i aplikacije za koje nisu potrebni markeri (AR tehnologija se pokreće bez ikakvih vanjskih okidača).

Postoje mnoga područja u kojima se proširena stvarnost koristi poput marketinga i oglašavanja, turizma [14], automobilizma [15], zdravstvene zaštite [16] te obrazovanja [17]. Stručnjaci tih područja približavaju se razvoju sadržaja i interaktivnih rješenja s ciljem omogućavanja ugodnih iskustava svojim korisnicima.

3.2 Primjena proširene stvarnosti u nastavi

Tijekom pandemije, kada su škole, fakulteti i laboratoriji bili zatvoreni, veliku ulogu u podučavanju imali su virtualni znanstveni laboratoriji koji su uključivali tehnologije virtualne i proširene stvarnosti. Ti su se laboratoriji i načini učenja zadržali zbog svog velikog potencijala i mnogobrojnih prednosti. Mnogi vjeruju da proširena stvarnost ima velik potencijal u poboljšavanju kvalitete učenja što se može objasniti iz Mayerove kognitivne teorije multimedijskog učenja, posebno po multimedijском principu, principu prostorne i vremenske povezanosti te načelu segmentiranja. [18] Pokazalo se da korištenje tehnologije proširene stvarnosti u učenju doprinosi poboljšanju konceptualnog razumijevanja te praktičnih i prostornih vještina kod učenika. [19]

Znanstvene studije pokazuju da AR tehnologija nudi mnoge prednosti u obrazovanju. [20] Na primjer, pomaže učenicima/studentima da se uključe u autentična istraživanja u stvarnom svijetu. [21] Prikazujući virtualne objekte uz stvarne, olakšava promatranje procesa koji su

teško uočljivi golim okom [22], povećava motivaciju za učenjem te omogućava razvoj istraživačkih vještina. [23] Osim toga doprinosi razvoju kritičkog mišljenja, rješavanja problema i komunikaciji, a sve to uz stjecanje pozitivnog mišljenja o radu u laboratoriju. [19]

U jednom od istraživanja autori ističu da učenici imaju problema s razumijevanjem gradiva kemije zbog nemogućnosti dočaravanja mikrosvijeta kao posljedice njihovih još nerazvijenih sposobnosti zamišljanja. Kako bi olakšali svojim učenicima i pomogli im su savladavanju tako malih veličina, autori su osmislili set alata za učenje temeljenih na proširenoj stvarnosti. To im je omogućilo da kontroliraju i kombiniraju 3D – modele mikročestica (aktiviranih pomoću markera) te izazivaju i promatraju njihove interakcije. Rezultati istraživanja pokazali su da su njihovi alati za pomoć u učenju imali značajan pozitivan učinak u razumijevanju gradiva. Također, učenici su izrazili pozitivan stav o svom iskustvu učenja uz pomoć proširene stvarnosti što je bilo u pozitivnoj korelaciji s njihovom ocjenom softvera. [24]

Razvojem tehnologije mnogi obrazovni znanstveni eksperimenti postali su dostupni u virtualnim okruženjima pomoću računala i mobilnih uređaja. Eksperimenti iz područja fizike provedeni pomoću tehnologije proširene stvarnosti pokazuju cijeli spektar prednosti poput povećane motivacije, angažmana i interesa kod učenika i studenata, ali i smanjenje troška, kognitivnog opterećenja i vremena za izvršavanje zadatka i provedbu pokusa. Međutim, postoje i negativne strane takve tehnologije kao što su spor softver, veliko iskorištenje energije (trošenje baterije), nestabilna veza, neadekvatno grafičko sučelje, mala veličina fonta i teško mijenjanje varijabli. [25] Neovisno o tome mnogi profesori i predavači traže načine za poboljšanje virtualnih laboratorija, koji bi pomogli u postizanju željenih rezultata u obrazovanju, upravo zbog sve većeg interesa i potrebe za provedbom nastave na daljinu.

3.3 CoulombsLawAR aplikacija

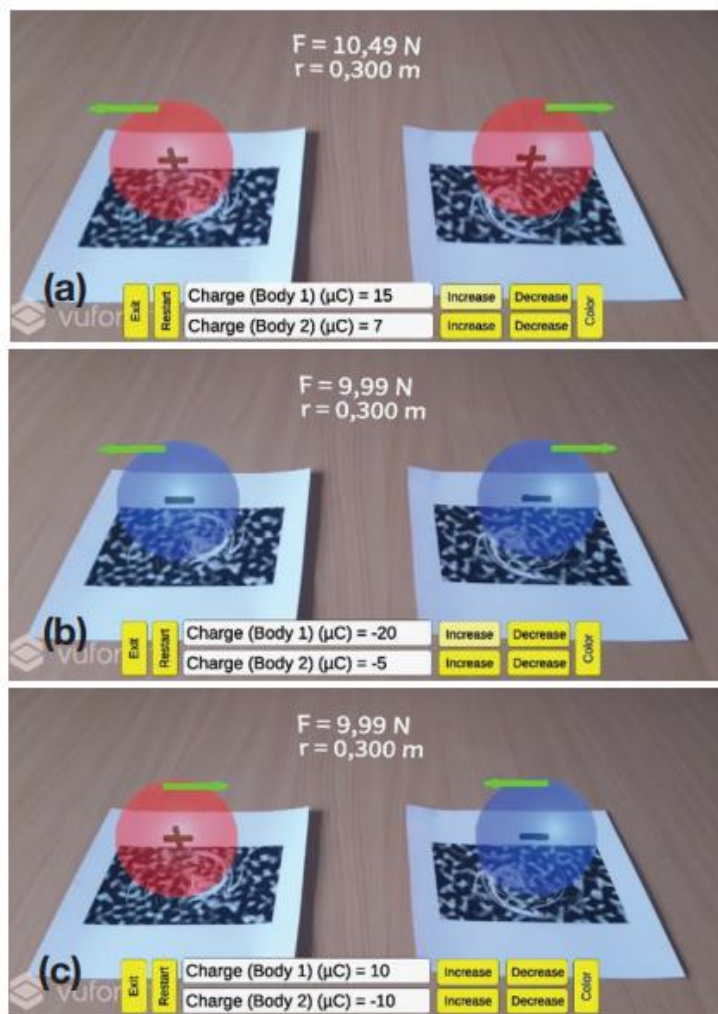
Zbog nedostatka vremena, potrebne aparature, ali i same zahtjevnosti izvođenja odgovarajućeg pokusa mnogi profesori Coulombov zakon objašnjavaju isključivo matematički što u većini slučajeva nije dovoljno da učenici zapravo razumiju njegov princip. Jedna mogućnost kako olakšati razumijevanje Coulombovog zakona je pomoću tehnologije proširene stvarnosti. U tu je svrhu izrađena aplikacija CoulombsLawAR. Cilj aplikacije CoulombsLawAR je upravo omogućavanje studentima i učenicima eksperimentalno razumijevanje matematičkog izraza za Coulombov zakon. To je aplikacija, kreirana za operacijski sustav Android, koja koristi tehnologiju proširene stvarnosti temeljenu na markerima kako bi obogatila tradicionalan način predavanja tog dijela fizike. Aplikacija je izrađena pomoću *Unity-ja* (software za izradu interaktivnog sadržaja u stvarnom vremenu) i *Vuforia SDK* (komplet za razvoj softvera proširene stvarnosti za mobilne uređaje). Jedinstveni uzorci za markere stvoreni su pomoću uređivača fotografija GIMP. Aplikacija koristi kameru mobilnih uređaja za opažanje markera što onda pokreće proširenu stvarnost. Mobilni uređaji kao alati za rad izabrani su zbog svoje široke rasprostranjenosti i dostupnosti među učenicima i studentima kao i zbog jednostavnog rukovanja te pozitivnog potencijala za konceptualno

razumijevanje u okruđu proširene stvarnosti. Prilikom korištenja aplikacije mobilni uređaj je moguće držati u ruci, ali zbog stabilnosti poželjno ga je staviti na držač (slika 5.).



Slika 5. Eksperimentalni postav [26]

Aplikacija radi na način da se kamera usmjeri prema markerima što aktivira trodimenzionalne sfere, koje predstavljaju nabijene čestice, na grafičkom korisničkom sučelju. Pomicanjem tiskanih markera duž x-, y- ili z-osi, mijenja se udaljenost između nabijenih čestica, a u samoj aplikaciji moguće je odrediti njihov naboj pritiskom na *increase /decrease*. Mijenjanjem fizičkih veličina, 3D-sfere reagiraju i ispisuje se odgovarajuća vrijednost sile između dvije nabijene čestice (slika 6.). [26]



Slika 6. Slika zaslona iz CoulombsLawAR aplikacije. (a) i (b) odbojna sila između istoimenih naboja, (c) privlačna sila između različitih naboja [26]

4. VREDNOVANJE UPOTREBLJIVOSTI

Mjerenje upotrebljivosti nekog proizvoda vrlo je važno kako bi se stekla prava slika. Mjere na kojima se temelji vrednovanje upotrebljivosti su:

- stopa uspjeha (mogu li korisnici uopće izvršiti zadatak),
- vrijeme potrebno za izvršavanje zadatka,
- stopa pogreške i
- subjektivno zadovoljstvo korisnika.

Metrika upotrebljivosti omogućava:

- praćenje napretka,
- procjene pozicije među konkurentima,
- donošenje zadnje odluke da/ne prije objavljivanja i
- stvaranje dodatnih planova za dizajn i tehnološka poboljšanja. [27]

4.1 SUS upitnik

Sustav za vrednovanje upotrebljivosti, SUS (*The System Usability Scale*) je jeftin, a koristan alat za procjenu upotrebljivosti nekog proizvoda poput Internet stranica, mobilnih uređaja, aplikacija i drugih. Pruža lako razumljive rezultate na ljestvici od 0 (pozitivno) do 100 (negativno). [28]

Godine 1986. John Brooke omogućio je javno korištenje svoje SUS ankete koju je osmislio 25 godina ranije kao dio upotrebljivosti inženjerskog programa. Osmislio je upitnik koji se koristio kao brzo mjerenje na koji su način korisnici doživjeli računalne sustave na kojima su radili. Takav se upitnik pokazao kao vrlo jednostavan i koristan pa ga je dao na korištenje i drugim organizacijama. Na taj su način potencijalno imali nešto s čime su mogli usporediti svoj sustav s konkurentskim. 1996. je objavio knjigu o upotrebljivosti u inženjerstvu, a od tada upotreba upitnika eksponencijalno raste. Najvažniji kriterij bio je da upitnik bude „brz“, odnosno da ne zahtjeva puno vremena i pisanja. Nakon 20 – 30 minuta izvršavanja zadatka, nerijetko teškog i frustrirajućeg, malo tko je htio ispunjavati klasične dugačke upitnike, a sve što je u SUS upitniku trebalo bilo je označiti kućicu kraj 10 pitanja. Nije bilo potrebno pisati dugačka mišljenja. SUS se sastoji od 10 pitanja, a svako ima ljestvicu od 5 odgovora koja se kreće od „u potpunosti se ne slažem“ do „u potpunosti se slažem“. U svom je radu o SUS anketi Brooke objasnio i način vrednovanja. Za pitanja 1, 3, 5, 7 i 9 (pozitivna) doprinos rezultatu bio je položaj na ljestvici minus jedan, a za pitanja 2, 4, 6, 8 i 10 (negativna) doprinos je pet minus pozicija na skali. Doprinos rezultata svake stavke iz ljestvice kreće se od 0 do 4, a krajnji zbroj svih doprinosa množi se s 2,5 kako bi se dobila ljestvica koja se kreće od 0 do 100. [29]

Iako danas postoje mnoge ankete i upitnici o upotrebljivosti nekog predmeta ili usluge, SUS ima nekolicinu prednosti koje ga čine tako atraktivnim. Sastoji se od samo deset izvaja

što ga čini kratkim za popunjavanje korisnicima, ali i jednostavnim za vrednovanje ispitivačima. Nije zaštićen autorskim pravima pa je isplativ i može se ocijeniti odmah po završetku popunjavanja. Može se koristiti na širokom spektru područja za vrednovanje bilo koje vrste tehnološkog sučelja poput Internet stranica, mobilnih telefona, interaktivnih glasovnih odgovora i aplikacija. Posljednje, treba naglasiti da se dobiva jedan rezultat u području od 0 do 100 što je lako razumljivo osobama iz svih područja koji rade na projektu koji se vrednuje. [28]

Rezultati SUS ankete pružaju informacije o tome kako korisnici vide upotrebljivost predmeta ispitivanja, ali ne daje odgovore na pitanja što to nije upotrebljivo i što treba promijeniti. Iz tog razloga postavljaju se i dodatna opisna pitanja kako bi rezultati bili potpuni i od pomoći za daljnji razvoj.

4.1.1 Isključivo pozitivan SUS upitnik

Bez obzira na mnoge prednosti SUS upitnika postoje problemi s izmjeničnim pozitivnim i negativnim formuliranjem stavki. Prvi je problem vezan uz kognitivno opterećenje zbog izmjeničnih prijelaza s pozitivnih na negativne stavke što zahtjeva dodatan kognitivni napor za obradu i može zbuniti ispitanike. Uz to uvijek postoji i problem osiguravanja mjere odgovarajuće razine čitanja i razumijevanja za osobe koje upitnik ispunjavaju. Na primjer, u originalnoj SUS anketi postoje dokazi o problemima s razumijevanjem kod ispitanika koji nisu izvorni govornici engleskog jezika. [30]

Drugi problem, povezan s prvim o kognitivnom opterećenju, je smanjena psihometrijska kvaliteta. Neke su studije pokazale da korištenje pozitivnih i negativnih pitanja u anketi može negativno utjecati na Cronbachovu alfu². [31] Jedno je istraživanje pokazalo da pozitivno formulirana pitanja obično imaju veća sredstva od negativno postavljenih [32], a isto takvo istraživanje na SUS-u pokazalo je suprotan učinak. Razlog tomu je što u SUS-u pozitivno naspram negativnog nije jednostavno preokrenuto. Koristi se riječ „ne“ umjesto opširnijih izraza koji bi donekle mogli promijeniti veličinu ili značenje stavki.

Treći se problem odražava kao potencijalni nedostatak izmjeničnih pitanja, a leži u njihovom kodiranju. Ako se negativno formulirane stavke ne kodiraju obrnuto prije bodovanja, doći će do nevažjećih rezultata.

Četvrti problem je također vezan uz obrnuto kodiranje, a javlja se kao zabrinutost zbog pojave da se ispitanici u većini slučajeva slože s izjavom u upitniku bez puno razmišljanja.

Kao posljedica ovih nedostataka razvijen je SUS s isključivo pozitivno postavljenim pitanjima. Usporedba rezultata standardnog i pozitivnog SUS-a pokazala je da su oba

² Cronbachova alfa je koeficijent koji se koristi za mjerenje pouzdanosti mjerne skale ili testa. Sastoji se od srednje vrijednosti korelacija između varijabli koje su dio skale.

pouzdana i da se rezultati minimalno razlikuju. [33] Prednost isključivo pozitivno formuliranog SUS upitnika leži u njegovoj lakoći razumijevanja bez izmjenjivanja s negativnim pitanjima.

4.2 HARUS upitnik

Ručne aplikacije proširene stvarnosti, HAR (*Handheld augmented reality*) moraju biti pažljivo dizajnirane i unaprjeđivane u skladu s povratnim informacijama korisnika. Niti jedan standardni upitnik ne uključuje percepcijske i ergonomske probleme vezane uz HAR. Iz tog je razloga osmišljen HARUS (*HAR Usability Scale*), upitnik o upotrebljivosti aplikacija koje koriste tehnologiju proširene stvarnosti [34]. Temelji se na mjerenju rukovanja – jednostavnosti rukovanja HAR sustavom i razumljivosti – lakoći razumijevanja informacija koje predstavlja HAR. Provedena su tri istraživanja o valjanosti i pouzdanosti HARUS-a i doneseni su sljedeći zaključci:

- U sva tri eksperimenta HARUS i SUS pokazuju značajnu pozitivnu povezanost
- U eksperimentu 1 HARUS ocjene su rasle s opadanjem vremena potrebnog za izvršavanje zadatka
- U eksperimentu 3 ispitanici (studenti) koji su dali više ocjene imaju tendenciju učiti duže vrijeme
- U eksperimentu 2 i 3 HARUS ocjene su rasle sa subjektivnim doživljajem pozitivnih emocija i motivacijom
- U eksperimentu 3 postoji velika razlika između SUS i HARUS ocjena što se pripisuje nedostatku specifičnih problema, koje pokriva HARUS sustav, u SUS-u
- U svim eksperimentima je HARUS pokazao dosljednost
- Ljestvice jednostavnosti rukovanja i razumljivosti imaju različite stupnjeve snage odnosa sa SUS-om, vremenom provedenim na zadatku, vremenom učenja, pozitivnim emocijama i motivacijom
- HARUS može biti razdijeljen u dvije odvojene ljestvice i njegove bi se dvije stavke trebale proučavati odvojeno jer je moguće da postoji više problema s rukovanjem nego s razumljivosti, i obrnuto.

Ovakvi alati su se pokazali korisnima istraživačima i autorima aplikacija za dobivanje povratnih informacija o uslugama koje pružaju. Omogućava im se usporedba inačica iste aplikacije, određivanje prioriteta između nekoliko značajki i usporedba s prethodno procijenjenim provedbama HAR-a.

4.3 UX upitnik

Prema definiciji, korisničko iskustvo, UX (*User experience*) obuhvaća sve doživljaje i reakcije osobe koje proizlaze iz upotrebe sustava, proizvoda ili usluge. Jednostavnije rečeno, to su osjećaji koji se javljaju kod korisnika tijekom interakcije s bilo čime što se u danom trenutku nalazi ispred njega.

Tijekom testiranja upotrebljivosti, od sudionika testa (koji predstavljaju ciljnog korisnika) se traži da izvrše određene zadatke što omogućuje dizajnerima i istraživačima da procijene koliko je lako korisniku izvršiti te zadatke bez prethodnog znanja o proizvodu, usluzi ili sustavu. Na taj se način dobiva sjajan uvid u to koliko je trenutni dizajn upotrebljiv i intuitivan te omogućava brzo uočavanje problema upotrebljivosti.

Testiranje korisničkog iskustva omogućuje:

- stjecanje dubljeg razumijevanja ciljnih korisnika, uključujući njihovo ponašanje u interakciji s proizvodom ili uslugom,
- sigurnost da dizajn funkcionira kako je predviđeno i da stvarno zadovoljava potrebe krajnjih korisnika,
- uočavanje problema i njihovo brzo rješavanje te
- identifikaciju područja za poboljšanje i prilika za inovacije. [35]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

Anketno istraživanje provedeno je u svrhu vrednovanja korisnosti aplikacije CoulombsLawAR na 156 ispitanika, studenata prve godine prijediplomskog studija Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije.

Za istraživanje korišteni su: SUS upitnik od 10 pitanja (ako je ukupan rezultat veći od 68, ispitivani sustav se smatra valjanim za korištenje [36]), HARUS upitnik sa 16 pitanja i UX (*User Experience*) upitnik sa četiri pitanja. Također, studenti su odgovorili na 5 otvorenih pitanja, a prije ispunjavanja ankete, dobili su zadatke koje su morali riješiti uz pomoć CoulombsLawAR aplikacije.

SUS, HARUS i UX upitnici pripadaju Likertovoj ljestvici – psihometrijskoj ljestvici kojom se utvrđuje stupanj slaganja, odnosno neslaganja ispitanika s nekom tvrdnjom. Likert (1932.) je razvio sustav mjerenja stavova tražeći od ljudi da odgovore na u kojoj se mjeri slažu s nizom tvrdnji o nekoj temi. Likertove ljestvice koriste formate odgovora sa fiksnim izborom i dizajnirane su za mjerenje stavova ili mišljenja na ordinalnoj ljestvici. Primjenom ordinalne ljestvice sa rastućim ili padajućim brojevima za slaganje ili neslaganje, stavovi i mišljenja se mogu mjeriti, odnosno kvantificirati. Ispitanicima se nudi izbor od pet do sedam unaprijed dogovorenih odgovora pri čemu se obično formira i neutralna kategorija. Svaki od ponuđenih odgovora ima pripadajuću brojčanu vrijednost. Jedan od načina analize pojedinih tvrdnji je deskriptivna statistika koja se u ovom radu i koristi. Određuju se učestalosti pojedinih odgovora te računaju srednje vrijednosti i odstupanje od njih (standardna devijacija) prema formuli:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

gdje je N broj članova niza, a \bar{x} aritmetička sredina.

SUS upitnik se koristi za procjenu upotrebljivosti proizvoda poput Internet stranica, mobilnih uređaja i aplikacija. Sastoji se od samo deset izjava što ga čini kratkim za popunjavanje korisnicima, ali i jednostavnim za vrednovanje ispitivačima. Nije zaštićen autorskim pravima pa je isplativ i može se ocijeniti odmah po završetku popunjavanja. Rezultati takve ankete pružaju informacije o tome kako korisnici vide upotrebljivost predmeta ispitivanja, ali ne daju odgovore na pitanja što to nije upotrebljivo i što treba promijeniti. Ukupan rezultat SUS upitnika izračunat je na način da se zbroj svih deset aritmetičkih sredina podijeli s 50, a taj se kvocijent zatim množi sa 100.

Dok SUS anketa daje povratne informacije o samoj upotrebljivosti, HARUS upitnik se temelji na mjerenju jednostavnosti rukovanja sustavom i lakoći razumijevanja informacija koje sustav predstavlja.

Za potpuno razumijevanje sveukupnih dojmova ispitanika te sagledavanja potpune i ispravne konačne slike o pruženom sustavu, vrlo je važno i korisničko iskustvo, odnosno UX upitnik koji podrazumijeva i uključuje ponašanja, stavove i emocije koje korisnik doživljava tijekom uporabe određenog proizvoda, sustava ili usluge. Drugim riječima, kako se osoba

osjeća tijekom interakcije sa sustavom koji može biti internetska stranica, aplikacija ili računalni *software*.

Sve tri vrste navedenih upitnika se međusobno nadopunjavaju, a s ciljem adresiranja nedostataka, u smislu otkrivanja što zapravo nije upotrebljivo i samim time zahtjeva određene promjene, dana su otvorena pitanja koja su formulirana na način da se na njih ne može odgovoriti s „da“ ili „ne“, već zahtijevaju duži odgovor. Takvi se odgovori zatim uspoređuju s onima koji su već poznati ispitivaču.

Rezultati se prikazuju u obliku tablica s pridruženih izračunatim vrijednostima te u obliku grafikona (za otvorena pitanja). U priloženim tablicama s rezultatima P označava izračunate srednje vrijednosti, a SD standardnu devijaciju (δ).

6. REZULTATI I RASPRAVA

6.1 Likertova ljestvica

Prvih deset pitanja provedene ankete su pitanja iz SUS upitnika (tablica 2.). Svako pitanje ima ljestvicu od 5 odgovora koja se kreće od „u potpunosti se ne slažem“ do „u potpunosti se slažem“. Srednje vrijednosti svih odgovora i standardne devijacije dane su u tablici 2. CoulombsLawAR aplikacija postigla je ukupan rezultat 85,12 koji ju svrstava u prihvatljivo područje. Na granici je između dobrog i odličnog prema sustavu vrednovanja korisnosti Bangora, Kortuma i Millera [28].

Tablica 2. SUS deskriptivna statistika

Broj	Stavka	P	SD
1	Želim često koristiti ovu aplikaciju.	3,41	0,98
2	Smatram da je ova aplikacija jednostavna.	4,24	0,89
3	Mislim da je ova aplikacija jednostavna za korištenje.	4,36	0,88
4	Mislim da se ova aplikacija može koristiti bez podrške stručne osobe	4,74	0,59
5	Smatram da su različite funkcije u ovoj aplikaciji dobro izvedene (npr. povezanost kontrola s vizualizacijom kugla).	4,26	0,88
6	Mislim da je ova aplikacija vrlo dosljedna (npr. vizualna sukladnost elemenata).	4,28	0,81
7	Mislim da bi većina ljudi vrlo brzo naučila koristiti ovu aplikaciju.	4,56	0,76
8	Smatram da je ova aplikacija vrlo intuitivna.	4,18	0,75
9	Osjećao/la sam se vrlo samopouzđano koristeći ovu aplikaciju.	4,17	0,90
10	Mogu koristiti ovu aplikaciju sa svojim prethodnim znanjem tj. bez potrebe za dodatnim učenjem.	4,40	0,77

Idućih 16 pitanja preuzeto je iz HARUS upitnika (tablica 3.). Koriste se kako bi se procijenila jednostavnost rukovanja i lakoća razumijevanja HAR (*Handheld augmented reality*) sustava. Svako pitanje ima ljestvicu od 5 odgovora koja se kreće od „u potpunosti se ne slažem“ do „u potpunosti se slažem“. Srednje vrijednosti svih odgovora i standardne devijacije dane su u tablici 3. Rezultati pokazuju da su informacije na ekranu međusobno dosljedne i lako za čitanje te da je rad s aplikacijom jednostavan. Međutim, pokazali su se i neki problemi poput držanja mobilnog uređaja dok aplikacija mjeri udaljenost između markera jer nepotpuna mirnoća ruke uzrokuje treperenje i mijenjanje vrijednosti Coulombove sile, kao i spora reakcija zaslona. Oba su problema spomenuta i u odgovorima na otvorena pitanja.

Tablica 3. HARUS deskriptivna statistika

Broj	Stavka	P	SD
1	Mislim da je za korištenje ove aplikacije potrebno mnogo mentalnog napora.	1,81	0,96
2	Mislim da je količina informacija prikazanih na ekranu primjerena.	4,42	0,77
3	Mislim da je informacija prikazana na ekranu teško čitljiva.	2,03	1,21
4	Smatram da zaslon uređaja reagira dovoljno brzo.	3,78	1,12
5	Mislim da su informacije prikazane na ekranu bile zbunjujuće.	1,72	0,94
6	Mislim da su riječi i simboli na ekranu laki za čitanje.	4,37	0,79
7	Smatram da je zaslon previše treperio.	2,25	1,24
8	Mislim da su informacije prikazane na ekranu bile međusobno dosljedne.	4,27	0,79
9	Mislim da interakcija s ovom aplikacijom zahtijeva puno fizičkog napora.	1,60	0,89
10	Smatram da je korištenje aplikacije bilo ugodno za moje ruke.	3,83	1,17
11	Bilo mi je teško držati uređaj dok sam koristio aplikaciju.	2,16	1,21
12	Bilo mi je lako mijenjati veličine putem aplikacije.	4,14	0,98
13	Nakon korištenja aplikacije prisutan je osjet umora u ruci.	1,88	1,02
14	Mislim da je aplikaciju lako kontrolirati.	4,14	1,01
15	Osjećao/la sam da gubim stisak i ispuštam mobilni uređaj u nekom trenutku.	1,54	0,92
16	Mislim da je rad s ovom aplikacijom lak i jednostavan.	4,21	0,96

Zadnji set pitanja Likertove ljestvice dio su UX (*User Experience*) upitnika (tablica 4.). Ljestvica od 7 odgovora odgovara na „Iskustvo rada s aplikacijom je:“. U tablici 4. su prikazane srednje vrijednosti i standardne devijacije svih odgovora. Rezultati pokazuju da studenti iskustvo rada s aplikacijom smatraju vrijednim, uzbudljivim, zanimljivim i motivirajućim.

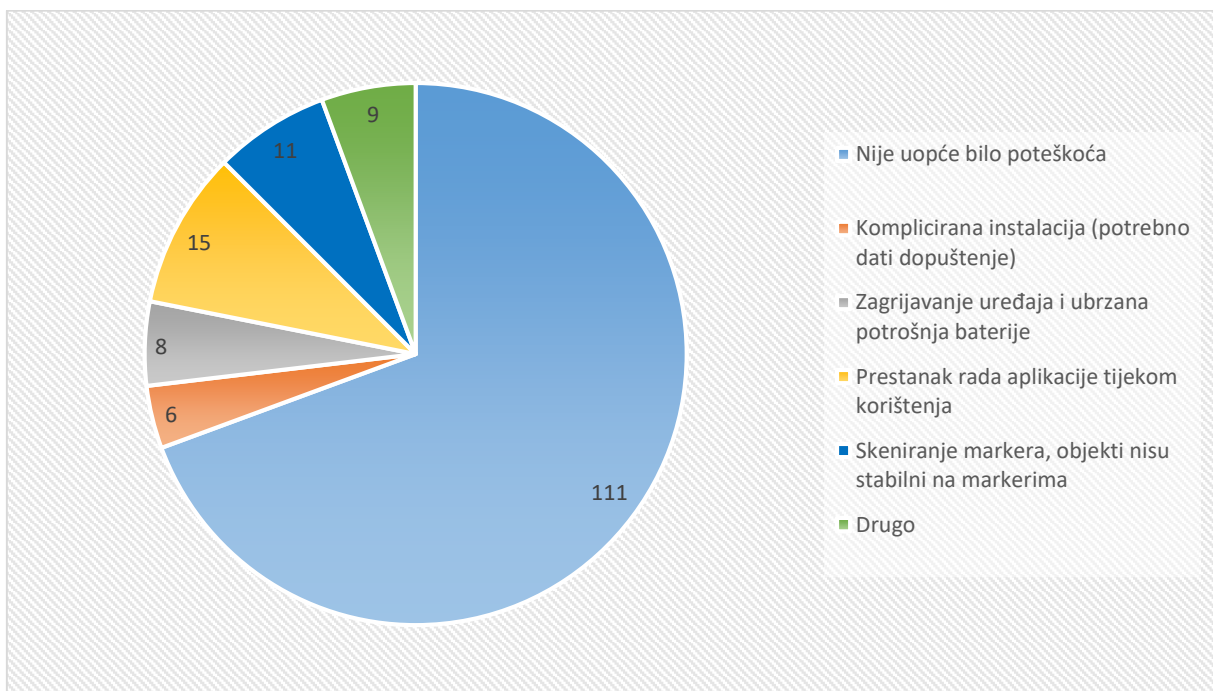
Tablica 4. UX deskriptivna statistika

	Iskustvo rada s aplikacijom je:		P	SD
1	Vrijedno (1)	Bezvrijedno (7)	2,03	1,42
2	Dosadno (1)	Uzbudljivo (7)	5,27	1,27
3	Nije zanimljivo (1)	Zanimljivo (7)	5,88	1,19
4	Motivirajuće (1)	Demotivirajuće (7)	2,13	1,31

6.2 Otvorena pitanja

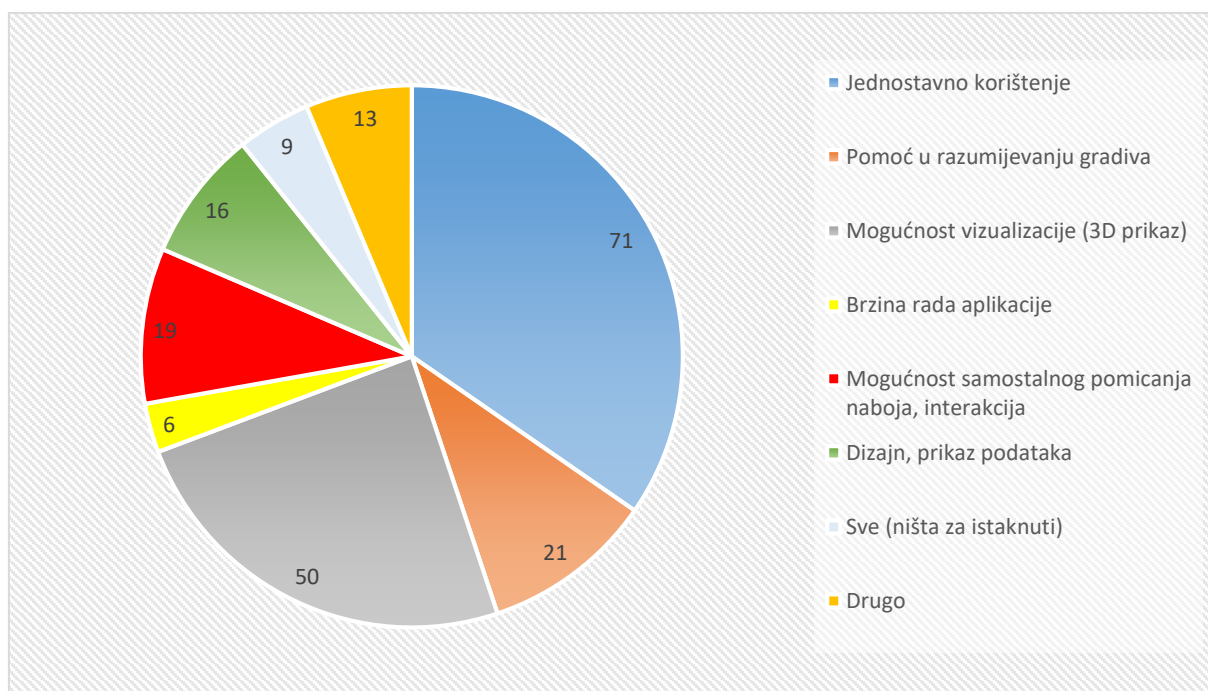
Na kraju, upitnik je sadržavao pet otvorenih pitanja. *(Napomena: broj zabilježenih odgovora veći je od broja ispitanika jer su pojedini studenti imali više različitih dojmova).*

Više od 60% ispitanika, njih 111 od 160, nije imalo nikakve tehničke poteškoće prilikom korištenja CoulombsLawAR aplikacije (slika 7.). Tehničke poteškoće koje su se javljale u nešto većem broju uglavnom su vezane uz usporen rad aplikacije (npr. „Aplikacija se ponekad znala zamrznuti.“), skeniranje markera (npr. „Imala sam poteškoća s prikazom tijela, nisu se jasno prikazala, tj. treperila su.“) te uz zagrijavanje uređaja popraćeno ubrzanom potrošnjom baterije.



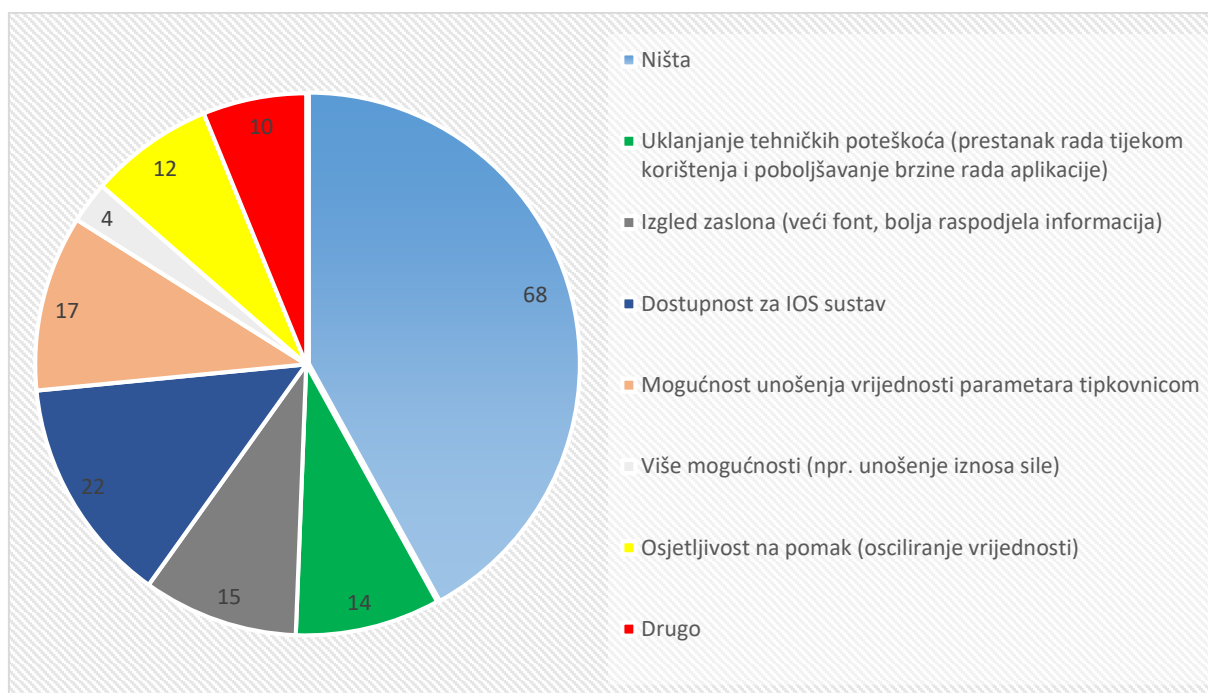
Slika 7. Grafički prikaz odgovora na pitanje: „Jeste li imali tehničke poteškoće (npr. instalacija, baterija mobilnog uređaja,..) u radu s aplikacijom?“

Iz odgovora na drugo postavljeno pitanje vidi se da se studentima najviše svidjela jednostavnost rukovanja aplikacijom kao i mogućnost vizualizacije pojmova koji su im inače opisani samo riječima i matematičkim izrazima što ih čini apstraktnima (npr. „Svidjelo mi se što sam vizualno mogla shvatiti ovu tematiku i kako je interaktivno i zanimljivo za koristiti.“) (slika 8.). Također, kao prednost, u velikom broju, naveli su pomoć u učenju i razumijevanju gradiva što je zapravo i svrha ove aplikacije.



Slika 8. Grafički prikaz odgovora na pitanje: „Što Vam se najviše sviđelo u radu s aplikacijom?“

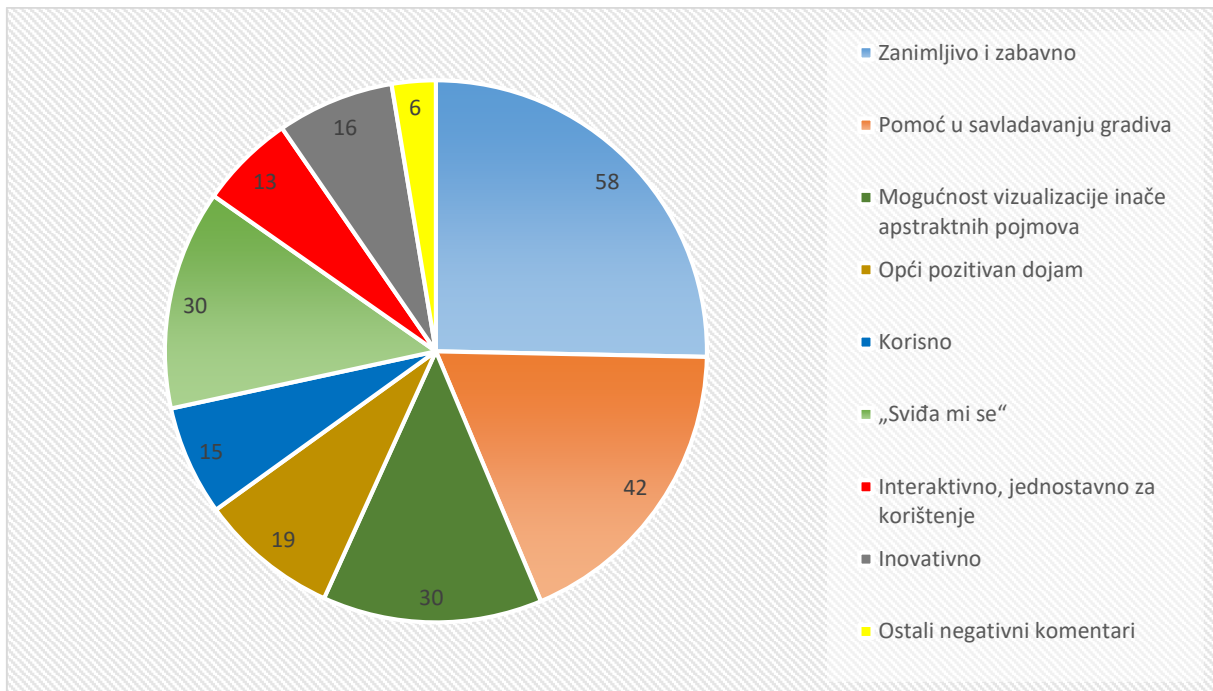
Kao odgovor na pitanje „Što biste mijenjali kod same aplikacije ili u radu s njom?“ 68 od 162 odgovora bila su „Ništa.“ (slika 9.). Studenti koji imaju mobilne uređaje s IOS operacijskim sustavom kao problem naveli su nemogućnost instalacije aplikacije na svoj uređaj. Druga najveća promjena koju bi uveli je unaprjeđenje osjetljivosti na pomak, tj. prestanak treperenja i osciliranja vrijednosti. Uz odgovore te vrste jedno od rješenja bilo je korištenje stalka za mobilne uređaje, a drugo unošnje vrijednosti parametara tipkovnicom, odnosno „da ne moraju postojati markeri za njeno korištenje“. Korištenjem tipkovnice, tj. isključivanjem markera izgubila bi se interakcija stvarnih predmeta (markera) i virtualnih (kugli) pa bi rješenje za treperenje zaslona i osciliranje vrijednosti moglo biti da se studentima osigura mogućnost korištenja stalaka za mobilne uređaje tijekom korištenja aplikacije. Nekolicina bi voljela veći font i bolju raspodjelu informacija na zaslonu.



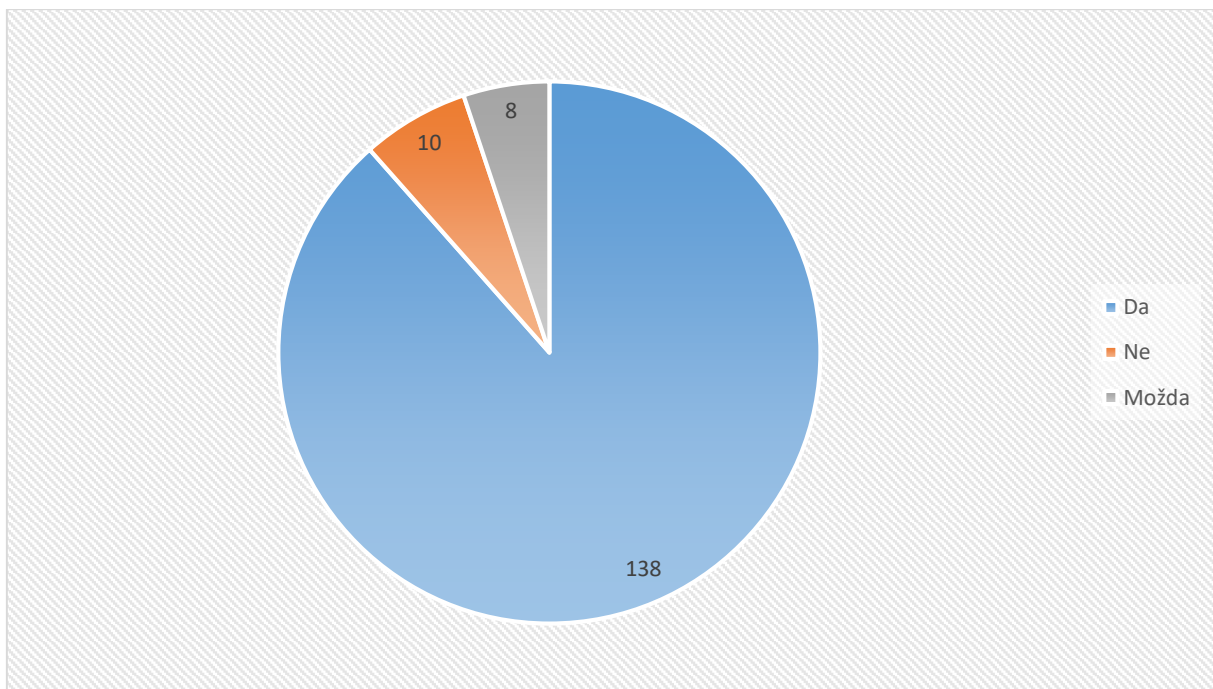
Slika 9. Grafički prikaz odgovora na pitanje: „Što biste mijenjali kod same aplikacije ili u radu s njom?“

Iz danih odgovora može se zaključiti da su ispitanici imali sveukupan pozitivan doživljaj o korištenju CoulombsLawAR aplikacije. Od ukupno 229 zabilježenih dojmova, njih 58 se slaže s izjavom „Smatram da je zanimljiv način za učenje fizike.“, a 42 odgovora vezana su uz olakšavanje savladavanja gradiva (npr. „Zanimljiv, vrlo poučan, lakše razumijevanje zbog same vizualizacije sadržaja.“) Od ostalih pozitivnih dojmova ističu se inovativnost, interaktivnost, mogućnost vizualizacije te sama korisnost aplikacije. Zabilježeno je svega 6 negativnih komentara, poput „Ne sviđa mi se.“ i „Mislim da se ovakve stvari mogu vrlo lagano savladati i bez aplikacije.“ (slika 10.).

Posljednje pitanje bilo je „Biste li željeli češće koristiti AR za učenje fizike?“, od 156 ispitanika 138 ih je izjavilo da bi voljeli češće koristiti tehnologiju proširene stvarnosti za učenje fizike, 10 ih nije sigurno ili bi koristili ponekad, a 8 ispitanika se ne bi voljelo služiti ovakvim i sličnim aplikacijama prilikom učenja (slika 11.).



Slika 10. Grafički prikaz odgovora na pitanje: „Koji je Vaš općenit dojam o učenju fizike pomoću AR tehnologije?“



Slika 11. Grafički prikaz odgovora na pitanje: „Biste li željeli češće koristiti AR za učenje fizike?“

7. ZAKLJUČAK

Kao što je već ranije i spomenuto, vrlo je važno učenicima, ali i studentima, apstraktne pojmove učiniti lakšim za razumijevanje, a ako je ikako moguće i vidljivima. U klasičnim učionicama i korištenjem standardnih metoda to je vrlo zahtjevno zbog same težine izvedbe fizikalnih pokusa, ali i nedostatka vremena, prostora i opreme. Stoga se poseže za alternativnim rješenjima u skladu s razvojem tehnologije te se uvode virtualni laboratoriji, tj. koristi se tehnologija proširene stvarnosti. Osim iz navedenih razloga, novi načini podučavanja bili su potrebni i tijekom pandemije.

Aplikacija CoulombsLawAR, na kojoj je naglasak u ovom radu, jedna je od aplikacija koje koriste tehnologiju proširene stvarnosti u svrhu obrazovanja, odnosno olakšavanja učenja i razumijevanja gradiva. Kako bi se odredila razina njene korisnosti, ali i otkrile moguće tehničke smetnje i drugi nedostaci, provedena je anketa među studentima prve godine prijediplomskog studija Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije. Prije ispunjavanja ankete ispitanici su morali riješiti nekoliko zadataka uz pomoć aplikacije.

Iz rezultata provedene ankete može se zaključiti da je opći dojam o korištenju aplikacije pozitivan. Studenti su istaknuli da im je aplikacija pomogla u razumijevanju gradiva i vizualizaciji novih pojmova te da im je rad s njom bio zanimljiv i jednostavan. Također, velika većina bi voljela nastaviti koristiti ovu i slične aplikacije za učenje fizike. Tijekom korištenja javile su se i neke poteškoće poput naglog prestanka rada, treperenja zaslona i ubrzane potrošnje baterije. Studenti koji koriste mobilne uređaje s IOS operativnim sustavom su iskazali nezadovoljstvo zbog nemogućnosti instalacije aplikacije na svoje uređaje. Jedan od nedostataka, treperenje zaslona odnosno teško postizanje da vrijednosti sile ne osciliraju prilikom skeniranja markera držanjem mobilnog uređaja u ruci, može se riješiti postavljanjem mobitela na stalak kako bi bio nepomičan.

Ukupan je dojam vrlo dobar što pokazuje i rezultat SUS upitnika koji iznosi 85,12 i time CoulombsLawAR aplikaciju, prema vrednovanju korisnosti, svrstava na granicu između dobrog i odličnog. Aplikacijom se postigao željeni cilj – pomoć u učenju i savladavanju gradiva, a rješavanjem prisutnih navedenih tehničkih poteškoća i omogućavanjem instalacije na uređaje s IOS operativnim sustavom, mogli bi se postići još i bolji rezultati uz više zadovoljnih korisnika.

LITERATURA

- [1] P. Kulišić, V. Lopac, *Elektromagnetske pojave i struktura tvari*, udžbenik fizike za studente Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, 2. izdanje (Školska knjiga, Zagreb, 2003.), str. 1. – 7.
- [2] <https://duplico.io/prosirena-stvarnost/> (pristup: 28.3.2023.)
- [3] H. D. Young, R. A. Freedman, *Sears and Zemansky's University Physics*, 13th ed. (Addison-Wesley, San Francisco, CA, 2016), str. 687. – 715.
- [4] E.M.Purcell, D.J.Morin, *Electricity and magnetism*, 3rd ed. (Harvard University, Massachusetts), str. 2. – 38.
- [5] Douglas C. Giancoli, *Physics: principles with application*, 7th ed. (Pearson education, USA), str. 444. – 450.
- [6] <https://www.khanacademy.org/science/high-school-physics/electric-charge-and-electric-force/conservation-of-charge/a/conservation-of-charge-ap-physics-1> (pristup: 26.3.2023.)
- [7] V. Dananić, Fizika 2, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, prvo predavanje (2012.)
- [8] R.S. Davis, *How to define the units of the revised SI starting from seven constants with fixed numerical values*, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **123**, 123021 (2018)
- [9] K. S. Krane, *Modern Physics*, 3rd ed. (Department of Physics, Oregon State University, 2012) str. 7. – 9.
- [10] G. Spavieri, G. T. Gillies, M. Rodriguez, *Physical implications of Coulomb's Law*, *Institute of Physics*, **41** (2004)
- [11] Liang-Cheng Tu, Jun Luo, *Experimental tests of Coulomb's Law and the photon rest mass*, *Department of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan*, **41** (2004)
- [12] M. Akcayir, G. Akcayir, *Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature*, *Educational research review* **20**, 1 – 11 (2017)
- [13] F. Herpich, R. L. M. Guarese, L. M. R. Tarouco, *A Comparative Analysis of Augmented Reality Frameworks Aimed at the Development of Educational Applications*, *Creative Education*, **8**, 1433-1451 (2017)
- [14] Chung, N., Han, H., Joun, Y., *Tourists' Intention to Visit a Destination: The Role of Augmented Reality (AR) Application for a Heritage Site*. *Computers in Human Behavior*, **50**, 588-599 (2018)
- [15] Rameau, F., Ha, H., Joo, K., Choi, J., Park, K., Kweon, I. S., *A Real-Time Augmented Reality System to See-Through Cars*. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **22**, 2395-2404 (2016)

- [16] Amali, S. S., Shiratuddin, M. F., Wong, K. W., Oskam, C. L., *Utilising Mobile-Augmented Reality for Learning Human Anatomy. Procedia-Social and Behavioral Sciences*, **197**, 659-668 (2015)
- [17] Majid, N. A. A., Mohammed, H., Sulaiman, R., *Students' Perception of Mobile Augmented Reality Applications in Learning Computer Organization. Procedia-Social and Behavioral Sciences*, **176**, 111-116 (2015)
- [18] Mayer R. E., *Multimedia learning, 2nd ed.* (Cambridge university press, 2009)
- [19] Akçayir M., Akçayir G., Pektaş H. M., Ocak M. A., *Augmented reality in science laboratories: The effects of augmented reality on university students' laboratory skills and attitudes toward science laboratories Comput. Human Behav.* **57** 334–42 (2016)
- [20] Cheng, K.-H., Tsai, C.-C., *Affordances of augmented reality in science learning: Suggestions for future research. Journal of Science Education and Technology*, **22** (2013)
- [21] Dede, C., *Immersive interfaces for engagement and learning. Science*, **323** (2009)
- [22] Wu, H.-K., Lee, S. W.-Y., Chang, H.-Y., Liang, J.-C., *Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. Computers & Education*, **62**, 41-49 (2013)
- [23] Sotiriou, S., Bogner, F. X., *Visualizing the invisible: Augmented reality as an innovative science education scheme. Advanced Science Letters*, **1**, 114-122 (2008)
- [24] Cai, S., Wang, X., Chiang, F. K., *A case Study of Augmented Reality Simulation System Application in a Chemistry Course, Computers in Human Behavior*, **37**, 31 – 40 (2014)
- [25] Y. Daineko, V. Dmitriyev, M. Ipalakova, "Using virtual laboratories in teaching natural sciences: An example of physics courses in university," *Comput. Appl. Eng. Educ.* **25**, 39–47 (2017)
- [26] A. Vidak, I. Movre Šapić, V. Mešić, *Coulomb's Law: Augmented Reality Simulation, The Physics Teacher*, **61**, 172 (2023)
- [27] <https://www.usability.gov/how-to-and-tools/methods/system-usability-scale.html> (pristup: 26.3.2023.)
- [28] A. Bangor, P. Kortum, J. Miller, *Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale, Journal of Usability Studies*, vol. **4** issue 3, 114 – 123 (2009)
- [29] J. Brooke, *SUS: A retrospective, Journal of Usability Studies*, vol. **8**, issue 2, 29 – 40 (2013)
- [30] Finstad, K., *The system usability scale and non-native English speakers. Journal of Usability Studies*, **1**, 185–188 (2006)
- [31] Salazar, M. S., *The dilemma of combining positive and negative items in scales. Psicothema*, **27**, 192–200 (2015)
- [32] Weems, G. H., Onwuegbuzie, A. J., & Collins, K. M., *The role of reading comprehension in response to positively and negatively worded items on rating scales. Evaluation & Research in Education*, **19**, 3–20 (2006)

- [33] P. Kortum , C. Ziegler Acemyan, F. L. Oswald, *Is It Time to Go Positive? Assessing the Positively Worded System Usability Scale (SUS)*, *Human Factors* Vol. 63, No. 5, 987–998 (2021)
- [34] M. E. C. Santos, J. Polvi, T. Taketomi, G. Yamamoto, C. Sandor, H. Kato, *A Usability Scale for Handheld Augmented Reality*, *Virtual Reality Software and Technology*, 167 – 176 (2014)
- [35] <https://www.uxdesigninstitute.com/blog/why-ux-testing-is-so-important/> (pristup 20.5.2023.)
- [36] J. Sauro, *SUSatisfied? Little-Known System Usability Scale Facts*, *User Experience Magazine* 10 (2011)