



UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI
Facultatea de Fizică
Școala Doctorală de Fizică



Bogdan CHIRIACESCU

**ABORDĂRI ȘTIINȚĂ – TEHNOLOGIE –
INGINERIE - MATEMATICĂ UTILE
ÎNVĂȚĂRII / ÎNȚELEGERII FIZICII LA
NIVEL PREUNIVERSITAR**

Rezumat

Teză de doctorat

Conducător științific

Prof. univ. dr. Valentin BARNA

București, 2023

MULȚUMIRI

*"The Road goes ever on and on
Down from the door where it began.
Now far ahead the Road has gone" (J.R.R. Tolkien)*

Realizarea lucrării de față a fost un drum lung, cu suișuri, coborâșuri, momente plăcute și unele mai dificile care, însă, inevitabil fac parte din activitatea unui student doctorand. Parcurgerea lui până în momentul redactării tezei de față, a necesitat un efort susținut, iar atingerea acestei etape nu ar fi fost posibilă fără ajutorul unor persoane cărora doresc să le aduc mulțumiri.

Mulțumesc domnului Prof. univ. dr. Valentin BARNĂ, coordonatorul științific al prezentei teze, pentru excelența îndrumare pe care mi-a acordat-o, pentru modul în care a înțeles să se implice în activitatea mea de cercetare și redactare a tezei de față.

Mulțumesc doamnei Conf. univ. dr. Cristina MIRON pentru că a avut încredere în capacitatea mea de a duce la capăt o astfel de sarcină, pentru colaborările avute în cercetarea de laborator, redactarea articolelor științifice sau sfaturile privind redactarea tezei.

Mulțumesc colaboratorilor cu care am lucrat la articolele publicate și la lucrările prezentate în conferințe, acestea reprezentând contribuțiile personale ale prezentei teze: Conf. univ. dr. Cătălin BERLIC, Lect. univ. dr. Sanda VOINEA, Conf. univ. dr. Iulia LAZĂR. Mulțumiri speciale colectivului de cadre didactice de la programul de studii de master Surse de energie regenerabile și alternative (SERA) pentru accesul la dotările specifice.

Doresc să mulțumesc tuturor celor care fac parte din comisia de susținere publică: domnului Prof. univ. dr. Ștefan ANTOHE, președinte de comisie, precum și membrilor acestei comisii – domnului Prof. univ. dr. Emil PETRESCU, doamnei Conf. univ. dr. Gabriela IACOBESCU și domnului Prof. univ. dr. Gheorghe TOMȘA - pentru răbdarea și profesionalismul cu care au citit și analizat această teză de doctorat și pentru aprecierile făcute.

Nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc membrilor familiei mele care m-au încurajat permanent și m-au sprijinit în tot ceea ce am realizat în această perioadă. Mi-au fost alături Lucia, Ana, Liviu, Mama, Cătă, Tolea și, mai ales, Fabi cu care am colaborat cât se poate de strâns la realizarea prezentei.

Dedic lucrarea de față memoriei a doi mari povestitori: tatăl meu, Liviu Chiriacescu, care mi-a fermecat copilăria cu istorisiri de tot felul, și bunicii mele, Nadejda Țurcanu – la ea am văzut prima dată „povești desenate”, un fel de proto-*Whiteboard animations*.

Nehoiu, 2023

CUPRINS

CAPITOLUL I. Repere teoretice ale abordării învățării STEM.....	1
<i>I.1. Necesitatea abordărilor STEM în contextul actual.....</i>	<i>1</i>
<i>I.2 Conceptul de STEM education și importanța sa. Rolul studiului Fizicii în dezvoltarea învățământului STEM.....</i>	<i>1</i>
CAPITOLUL II. Rolul conceptelor fundamentale de Fizică în învățarea STEM. .3	
<i>II.1. Introducere.....</i>	<i>3</i>
<i>II.2. Whiteboard Animation – instrument pentru predarea Fizicii.....</i>	<i>3</i>
II.2.1. Whiteboard Animation – prezentare generală și modul în care este folosit în predarea Fizicii.....	3
II.2.2. Modalități de creare a unei Whiteboard Animation.....	4
<i>II.3. Abordări calitative în predarea Principiilor Teoriei Relativității</i>	
<i>Restrânse și a consecințelor lor</i>	<i>4</i>
II.3.1. Abordări conceptuale ale unor noțiuni fundamentale de Fizică.....	4
II.3.2. Introducerea Postulatelor lui Einstein folosind Whiteboard Animation	5
II.3.3. „Paradoxul gemenilor” explicat din punct de vedere calitativ, folosind Whiteboard Animation	8
II.3.4. „Paradoxul garajului” prezentat cu ajutorul Whiteboard Animation	12
<i>II.4. Concluzii privind predarea calitativă a noțiunilor de Fizică utilizând Whiteboard Animation.....</i>	<i>15</i>
CAPITOLUL III. Argumentarea experimentală a abordărilor STEM în învățarea noțiunilor de Fizică în liceu.....	17
<i>III.1. Contextualizarea folosirii experimentului în învățarea Fizicii.....</i>	<i>17</i>
<i>III.2. Studiul experimental al pendulului Kater utilizând instrumente noi, adaptate unor abordări STEM</i>	<i>17</i>
III.2.2. Dispozitiv experimental și modul de lucru	18
III.2.3. Măsurarea perioadei de oscilație a pendulului cu ajutorul platformei electronice Arduino	20
III.2.4. Măsurarea perioadei de oscilație a pendulului cu ajutorul programului de analiză video Tracker	23
III.2.5. Concluzii ale studiului experimental al pendulului Kater.....	26

<i>III.3. Determinarea magnitudinii unui cutremur folosind o aplicație</i>	
<i>GeoGebra</i>	26
III.3.1. Importanța studierii noțiunilor de seismologie în școli și metode studiu.....	26
III.3.2. Magnitudinea unui cutremur și scara Richter.....	27
III.3.3. Aplicație GeoGebra construită pentru determinarea magnitudinii unui cutremur	28
CAPITOLUL IV. Integrarea învățării STEM pentru studiul dinamicii fluidelor.	31
<i>IV.1. Introducere – puterea vântului și importanța studierii sale de către elevi</i>	
.....	31
IV.1.1. Puterea vântului. Scurt istoric al utilizării puterii vântului.....	31
IV.1.2. Puterea vântului. Considerații teoretice.....	32
IV.1.3. Energia eoliană în context educațional.....	33
IV.1.4. Studiul dinamicii fluidelor la nivel liceal în context STEM.....	34
IV.1.5. Abordarea complexă, de la virtual la real, a studiului mecanicii fluidelor prin intermediul turbinelor eoliene.....	34
<i>IV.2. Utilizarea unui tunel aerodinamic virtual în studiul comportării diferitelor profile sub influența vântului</i>	
.....	35
IV.2.1. COMSOL Multiphysics și FreeCAD – instrumente folosite pentru dezvoltarea unui tunel aerodinamic virtual	35
IV.2.2. Comportarea unor forme geometrice simple din punct de vedere aerodinamic studiată în tunelul virtual	41
IV.2.3. Studiul unor modele de turbine eoliene folosind tunelul aerodinamic virtual.....	45
IV.2.4. Concluzii privind utilizarea tunelului aerodinamic virtual în studiul dinamicii fluidelor.....	56
<i>IV.3. Activități practice pentru studiul dinamicii fluidelor.....</i>	
.....	57
IV.3.1. Studiul experimental al caracteristicilor aerodinamice ale unor forme geometrice	57
IV.3.2. Studiul experimental al modelelor simple de turbine virtuale	58
<i>IV.4 Concluzii la capitolul IV.....</i>	
.....	64
CAPITOLUL V. Factori care influențează atitudinea profesorilor privind adoptarea metodelor de predare STEM.....	66
<i>V.1. Metodele de predare STEM și modul în care se raportează profesorii la acestea</i>	
.....	66
<i>V.2. Variabilele luate în calcul în studiul [12].....</i>	
.....	68

*Abordări Știință – Tehnologie – Inginerie – Matematică utile învățării /
înțelegerii Fizicii la nivel preuniversitar*

drd. Bogdan Chiriacescu

V.2.1. Competențele (COM) ca variabilă externă.....	68
V.2.2. Variabilele de mediere.....	69
V.2.3. Atitudinea (ATT) ca variabilă dependentă.....	70
<i>V.3. Detaliile studiului efectuat în rândul profesorilor din învățământul preuniversitar privind integrarea STEM în practicile didactice</i>	<i>71</i>
V.3.1. Ipotezele de lucru ale studiului.....	71
V.3.2. Metodologia utilizată în cadrul studiului [12].....	72
V.3.3. Rezultatele măsurărilor studiului.....	74
V.3.4. Rezultate.....	76
V.3.5. Discuții	81
Concluzii.....	85
Bibliografie.....	95

Notă: Numerotarea subcapitolelor, figurilor, tabelelor și formulelor din prezentul rezumat este aceeași cu cea din teza de doctorat.

CAPITOLUL I

Repere teoretice ale abordării învățării STEM

1.1. Necesitatea abordărilor STEM în contextul actual

STEM, acronim pentru *science, technology, engineering, and mathematics*, este un concept care unifică educația în domeniile științelor naturii, tehnologiilor, ingineriilor și matematicii. Deși în SUA conceptul de *STEM* (sau, pentru început, *SMET*) *education* - educația STEM - a apărut încă din 1990, el s-a impus la nivel internațional abia după 2005 fiind adoptat de țările care urmăresc să se dezvolte din punct de vedere tehnologic și al inovării [1]. În SUA, acolo unde s-a născut conceptul, includerea disciplinelor STEM și abordarea lor integrată este de mult o prioritate a oficialităților, datorită intenției acestora ca SUA să devină lider mondial în ceea ce privește achizițiile din domeniile științelor și al ingineriilor [2]. Educația STEM a câștigat deja o poziție proeminentă în reformele educaționale din mai multe țări, precum China, Germania, Coreea de Sud, Finlanda, țări care au inclus educația prin STEM în documentele oficiale ale guvernelor naționale [3].

Există o preocupare pentru domeniul STEM și în România. Astfel, în proiectul „România educată” se arată necesitatea unui accent deosebit pus pe studiul disciplinelor STEM, cu atât mai mult cu cât ultimele rapoarte PISA arată că elevii români nu dețin decât în mică măsură astfel de cunoștințe [4]. De asemenea, noile programe pentru disciplinele STEM de la nivel de gimnaziu și liceu dovedesc o preocupare sporită pentru integrarea acestor discipline și aplicarea lor în situații desprinse din viața reală [5, 6].

1.2 Conceptul de STEM education și importanța sa. Rolul studiului Fizicii în dezvoltarea învățământului STEM

Conform literaturii de specialitate, conceptul de educație STEM - *STEM education* - presupune o abordare interdisciplinară de învățare în care concepte academice riguroase sunt integrate în lecții privind aspecte din viața reală atunci când elevii aplică cunoștințe din domeniile științei, tehnologiilor, ingineriilor și matematicii în situații de învățare care fac legătura dintre școală, comunitate, locuri de muncă și încadrarea lor într-un context general, permițând dezvoltarea

cunoștințelor de bază STEM și a abilității de a fi competitiv raportat la noile realități economice [7, 8].

Alfabetizarea STEM se referă în cazul elevilor la [9]:

- cunoștințe, atitudini și abilități pentru a identifica întrebări și probleme în situații reale, explicarea mediului natural și a celui antropic și adoptarea unor concluzii bazate pe dovezi privind probleme legate de STEM;

- perceperea principalelor caracteristici ale disciplinelor STEM ca forme ale cunoașterii, cercetării și proiectării umane;

- conștientizarea modului în care disciplinele STEM modelează mediul nostru material, intelectual și cultural;

- voința de a se angaja ca un cetățean constructiv, interesat și reflexiv în probleme legate de STEM și cu idei științifice, tehnologice, inginerești și matematice.

Pentru ca educația STEM să aibă un impact pozitiv sporit în rândul elevilor, trebuie respectate câteva principii precum [10]:

1) problemele și lecțiile STEM trebuie să fie bazate pe exemple din viața reală – acest lucru duce la o creștere a motivației și interesului elevilor față de studiu. Pe lângă aceasta, o astfel de abordare contribuie la dezvoltarea competențelor specifice secolului 21 printre care se numără creativitatea, curiozitatea, spiritul de echipă, gândirea critică.

2) disciplinele STEM sunt conectate prin idei și abilități, ele împărtășesc aceleași mari idei, structuri conceptuale și practici care, odată integrate, permit elevilor să aplice cunoștințele în situații foarte variate și să facă legături care le permit transferul de cunoștințe între discipline diferite.

Toate fenomenele naturale, fie că vorbim despre reacții chimice, funcționarea organismelor vii sau modul în care este alcătuită materia sunt explicate doar cu ajutorul legilor Fizicii. Mai mult, anumite legi ale Fizicii pot fi aplicate și în studii economice sau de altă natură. Legătura dintre Fizică și domeniile Tehnologiilor sau Ingineriilor este una deosebit de puternică și ea este observată de cadrele didactice foarte clar [11]. Ce dorim să demonstrăm este că, dacă Fizica poate fi abordată și anumite fenomene înțelese fără a fi nevoie de cunoștințe din celelalte domenii STEM, studiul STEM este imposibil fără stăpânirea noțiunilor de Fizică.

Prin teza de față, doresc prezentarea unor instrumente pe care le-am proiectat și aplicat pentru învățarea STEM și care pot avea un impact pozitiv în înțelegerea Fizicii.

CAPITOLUL II

Rolul conceptelor fundamentale de Fizică în învățarea STEM

II.1. Introducere

Contextul actual face din ce în ce mai evidentă nevoia unor materiale suport pentru orele de Fizică, materiale suficient de versatile încât să poată fi utilizate atât la clasă, în interacțiunea directă, cât și în cadrul învățământului la distanță.

Fără a avea pretenția unei metode infailibile, utilizarea computerului, a resurselor online și a simulărilor computerizate reprezintă instrumente foarte puternice care, alături de metodele clasice, oferă elevilor mai multe opțiuni precum și medii de învățare mai eficiente prin instrumentele pe care le dezvoltă.

II.2. Whiteboard Animation – instrument pentru predarea Fizicii

II.2.1. Whiteboard Animation – prezentare generală și modul în care este folosit în predarea Fizicii

Whiteboard animation numite în literatură și *Videoscribe*, *Scribes* sau *Scribe videos* [13] sunt scurte filme care prezintă procesul de desenare a unei imagini, imagine care redă un fenomen fizic sau o parte a unei narațiuni, de obicei pe o tablă sau pe un suport asemănător unei table. Conform literaturii de specialitate [14], caracteristicile proeminente ale unui *Whiteboard animation* sunt simplitatea desenului și conciziunea explicațiilor.

Într-una dintre lucrările referitoare la utilizarea multimedia în procesul de educație [16], sunt enunțate cele 12 principii ale învățării cu ajutorul instrumentelor multimedia și, evident, condițiile pe care trebuie să le îndeplinească un material multimedia pentru a fi eficient pentru participanții la procesul de învățare, în cazul nostru elevii: *principiul coerenței*, al *semnalării/sublinierii*, *principiul redundanței*, al *contiguității spațiale și temporale*, al *contiguității temporale*, *principiului segmentării*, al *instruirii prealabile*, *principiul modalității*, al *personalizării*, *principiul și principiul imaginii*.

Un *Whiteboard animation* folosit ca instrument de predare/învățare respectă, practic, toate aceste principii – este poate unul dintre puținele instrumente de predare despre care se poate spune așa ceva, multe altele având aspecte care le îndepărtează de la acestea.

II.2.2. Modalități de creare a unei Whiteboard Animation

Pentru realizarea materialelor ce vor fi prezentate în acest capitol [17 - 19], în care sunt expuse noțiuni introductive de Teoria relativității restrânse pentru elevi de liceu, am utilizat o tabletă grafică. Aceasta a fost conectată la un computer, iar filmarea am realizat-o cu ajutorul unui program de *screen cast*. În realizarea materialului am urmărit câțiva pași logici. Primul pas a fost realizarea scenariului. Al doilea pas a fost înregistrarea coloanei sonore. Înregistrarea a fost făcută utilizând microfonul incorporat al computerului. A urmat prelucrarea materialului audio constând în eliminarea zgomotelor nedorite, tăierea materialului suplimentar. După ce a fost realizată coloana sonoră, a urmat înregistrarea video. Având în minte narațiunea, am realizat desenele pe tableta grafică, înregistrând concomitent spațiul de lucru. Ultima etapă a fost editarea audio-video și obținerea produsului finit.

Din punct de vedere tehnic, pentru realizarea materialelor, am folosit o tabletă grafică *Genius MousePen i608x* conectată la un computer. Pentru realizarea desenelor, a prelucrării grafice, a înregistrărilor audio și post-procesării, am folosit următoarele programe și metode de lucru: programul *Krita* [20] pentru desen și prelucrare grafică, programul *Kazam* [21] pentru captura de ecran, programul *Audacity* [22] pentru captură și prelucrare audio și programul *Kdenlive* [23] pentru editare video.

II.3. Abordări calitative în predarea Principiilor Teoriei Relativității Restrânse și a consecințelor lor [17 - 19]

II.3.1. Abordări conceptuale ale unor noțiuni fundamentale de Fizică

Abordarea conceptuală a predării noțiunilor de Fizică constă în prezentarea fenomenului din punct de vedere calitativ folosind exemple extrase din viața reală.

Întrebarea pe care trebuie să ne-o punem este: Care trebuie să fie ordinea logică în abordarea predării Fizicii? Matematizarea și abstractizarea excesive a

noțiunilor de Fizică predate pot duce la o demotivare a elevilor [28], ceea ce mai departe conduce la un dezinteres sporit față de studiul Științelor naturii în general și a Fizicii în special [29], Fizica fiind domeniul în care aparatul matematic este cel mai elaborat.

Prin urmare, bazat pe argumentele de mai sus, consider că, pentru introducerea unui capitol al Fizicii, este preferabilă o abordare fenomenologică în cursul căreia să fie prezentate noțiunile de bază într-un limbaj cât mai ușor de înțeles de către elevi, astfel încât ei să poată avea o imagine de ansamblu și să fie incitați să afle mai multe, putând urma, ulterior, aprofundarea acestor noțiuni de bază și introducerea limbajului matematic.

II.3.2. Introducerea Postulatelor lui Einstein folosind Whiteboard Animation [17]

Unul dintre capitolele cele mai interesante din întreaga materie de liceu este „Noțiuni de Teoria Relativității Restrânse.

Pentru a face o introducere mai lină în acest capitol destul de dificil, am realizat trei *Whiteboard Animations* – unul care se referă la prezentarea Principiilor Teoriei Relativității Restrânse și primele consecințe [17], al doilea la „Paradoxul gemenilor” [18], una dintre cele mai interesante probleme-consecință a Postulatelor lui Einstein, iar al treilea la ”Paradoxul garajului”, o abordare conceptuală a contracției relativiste [19].

După o discuție prealabilă în care se prezintă dificultățile Mecanicii clasice în explicarea fenomenelor Electrodinamicii, este momentul pentru introducerea Postulatelor TRR. Acest lucru va fi făcut cu ajutorul primului *Whiteboard animation*.

Urmează enunțarea celor două Postulate, cu ilustrarea lor (Fig.2.11 și Fig. 2.12). Pentru realizarea ambelor imagini sunt folosite simboluri astfel încât mesajul să fie cât mai clar.

Prima consecință despre care se vorbește în literatura de specialitate este caracterul relativ al simultaneității. Pentru punerea în evidență a acestei consecințe, am construit o poveste legată de răpirea unei pisici și a unui șoricel de către extraterestri (Fig. 2.13).

Odată răpiți cei doi „eroi” ai poveștii noastre, OZN-ul accelerează până când ajunge la viteze foarte mari, comparabile cu viteza luminii. Evenimentul nu scapă atenției unui supererou, un „Supermotan” care are abilități deosebite,

printre care se numără capacitatea de a se deplasa cu viteze foarte mari și aceea de a lansa descărcări energetice asemănătoare unor fulgere.



Fig. 2.11 – Ilustrarea primului Postulat al TRR – pentru toți observatorii „radarul” arată aceeași viteză de deplasare a mașinii presupusă a se mișca cu viteza luminii [17]



Fig. 2.12 - Ilustrare a celui de-al doilea postulat. Toți observatorii, indiferent de sistemul în care se află, observă derularea evenimentului la fel. [17]

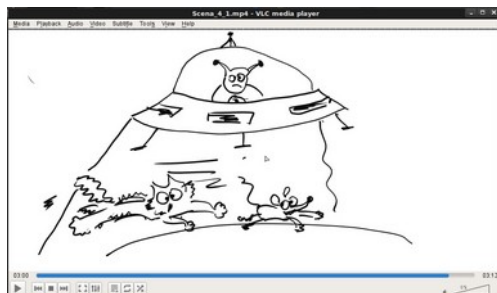


Fig. 2.13 - Imagine din animație ilustrând răpirea „eroilor” noștri [17]

Când a ajuns din urmă nava cosmică a răpitorilor el se oprește pentru o fracțiune de secundă fiind în repaus față de un eventual observator de pe Pământ. Supermotanul trimite simultan două fascicule de energie către navă în scopul de a opri răpitorii din fuga lor. Cele două „fulgere” ating - unul partea anterioară a OZN-ului, iar celălalt partea posterioară a acestuia. Aflându-se la distanțe egale față de aceste două locuri („prova” și „pupa” navei cosmice) cele două „fulgere” lovesc simultan nava. Așadar, cele două evenimente sunt simultane atât din punctul lui de vedere, cât și al unui observator de pe Pământ (Fig. 2.15).

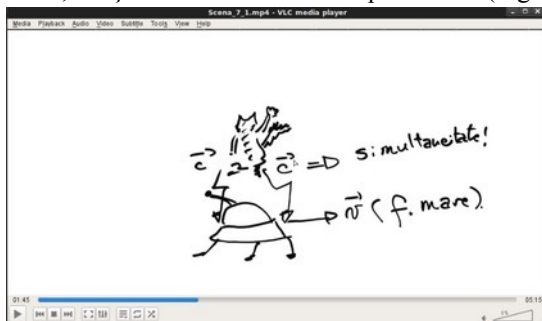


Fig. 2.15 - Extras din Whiteboard Animation - Supermotan trimite fulgerele. Acestea lovesc simultan partea din față și cea din spate ale navei extraterestre [17]

Nu trebuie să uităm, însă, că OZN-ul se mișcă față de Supermotan cu o viteză foarte mare, ceea ce face ca percepția celor aflați în navă să fie modificată. În sistemul de referință legat de navă, între momentul în care fulgerul din partea anterioară atinge nava și cel în care cel din partea posterioară ajunge OZN-ul din urmă, se scurge ceva timp (Fig. 2.16). Rezultă că evenimente care au fost simultane din punctul de vedere al observatorilor externi navei, nu sunt simultane din punct de vedere al călătorilor cu viteze foarte mari aflați la bordul navei.

Cum putem explica acest lucru? Tocmai folosind cele două postulate ale TRR ale căror consecință este relativitatea simultaneității. Conform primului postulat, din punct de vedere al observatorului extern, în repaus, lumina se deplasează cu aceeași viteză în toate direcțiile și, parcurgând distanțe egale, ajunge simultan la „șintă” - cele două capete opuse ale navei.

În schimb, tot datorită prevederilor acestui postulat, pentru observatorul aflat pe nava cosmică lumina atinge mai întâi extremitatea navei aflată în partea din față pe direcția deplasării, și mai apoi în partea opusă.

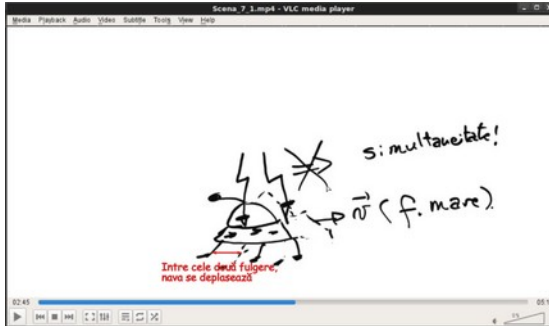


Fig. 2.16 – Ilustrarea punctului de vedere al călătorului extraterestru: între cele două fulgere, nava se deplasează [17]

II.3.3. „Paradoxul gemenilor” explicat din punct de vedere calitativ, folosind Whiteboard Animation [18]

Una dintre cele mai interesante aplicații ale acestor consecințe este ceea ce a fost numită „Paradoxul gemenilor” [30]. Pe scurt, paradoxul constă în faptul că un călător îmbătrânește mai puțin decât o persoană care nu se mișcă. Cu cât viteza cu care se deplasează călătorul este mai mare, cu atât diferența de vârstă este mai mare, astfel încât, la viteze relativiste diferența este remarcabilă.

Și aici, în cazul „Paradoxului gemenilor”, prezentarea noțiunilor teoretice poate îmbrăca haina unei povești și explicațiile, în primă instanță, pot fi date din punct de vedere calitativ. Astfel, povestea spusă în *Whiteboard animation* [18] se referă la doi gemeni identici, Stelu și Geo, amândoi foarte isteți și dornici de studiu. Stelu, fiind un spirit mai aventuros, se face astronaut. Geo, mai cu „picioarele pe Pământ”, se face astronom (Fig. 2.17).

Stelu se îmbarcă într-o expediție în spațiul cosmic, expediție care se desfășoară cu viteze comparabile cu viteza luminii. La întoarcere, ei constată că Geo, rămas pe Pământ, a îmbătrânit mai mult decât Stelu, iar calculele făcute cu expresia dilatării duratelor demonstrează acest lucru (vezi Fig. 2.18).



Fig. 2.17 – Extras din Whiteboard animation -cei doi frați gemeni la îmbarcarea lui Stelu în călătorie [18]

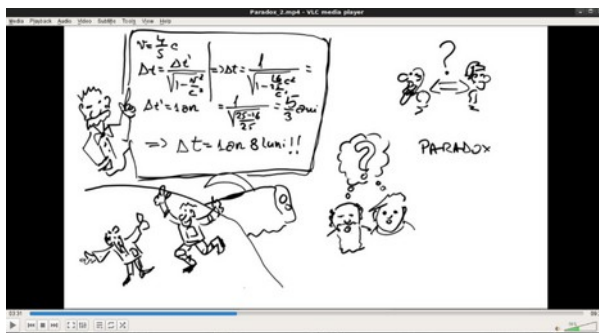


Fig. 2.18 – Calculul dilatării duratelor, ilustrat în Whiteboard animation [18]

Dacă încercăm să inversăm punctul de vedere, adică dacă l-am considera pe Stelu ca fiind în repaus și pe Geo în mișcare, situația ar trebui să fie răsturnată, ori aceasta nu se întâmplă, și de aici rezultă paradoxul. În animația realizată am luat chiar și un exemplu numeric, considerând că viteza cu care călătorește Stelu este 4/5 din viteza luminii, vom obține:

$$v = \frac{4}{5}c \quad (\text{II.19})$$

Introducând această valoare în expresia dilatării duratelor

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (\text{II.20})$$

unde $\Delta t' = 1 \text{ an}$, rezultă că

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{16}{25}}} = \frac{5}{3} = 1 \text{ an} \wedge 8 \text{ luni} \quad (\text{II.21})$$

Așadar, diferența este semnificativă, dar să nu uităm că paradoxul constă în faptul că lucrurile se aplică doar călătorului și nu celui care rămâne pe Pământ.

Explicația calitativă utilizată în animație este o adaptare după Paul G Hewitt [24] și Lewis Carroll Epstein [25, 26]. Ambii frați pot transmite semnale luminoase la intervale de timp de câte 10 minute. Semnalele sunt recepționate de către fiecare frate în parte. Există următoarele situații:

1. Stelu se află pe o orbită staționară în jurul Pământului, deci, practic, se găsește în stare de repaus față de fratele său. În această situație, în interval de o oră fiecare dintre cei doi emite/recepționează câte 6 semnale luminoase. Singurele diferențe/întârzieri sunt datorate faptului că, deși se deplasează cu viteze foarte mari, lumina are totuși de străbătut distanțe destul de mari. De exemplu, lumina provenită de la Soare are nevoie de aproximativ 8min. pentru a ajunge pe Pământ.

2. Stelu se îndepărtează cu o viteză foarte mare de Pământ timp de o oră, se întoarce brusc și se întoarce „la bază” cu aceeași viteză, deci într-un interval de timp tot de o oră. Vom privi această situație din două perspective:

a) Să ne ocupăm mai întâi de semnalele luminoase transmise de Stelu către Pământ la intervale de timp de 10 min. (Fig. 2.19). Atunci când călătorul (Stelu) se îndepărtează de Pământ, fratele său aflat la sol recepțează semnalele la intervale de timp mai mari decât 10min.

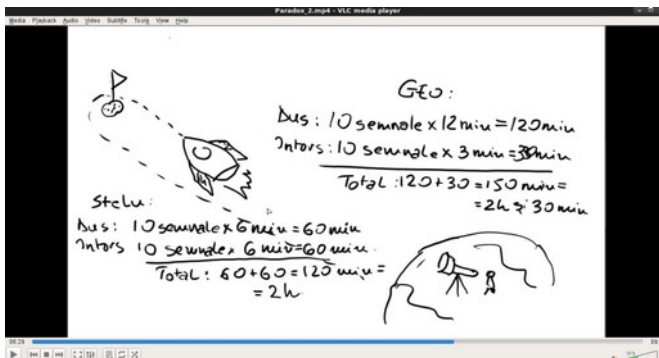


Fig. 2.19 – Situația semnalelor luminoase emise de pe nava spațială, ilustrată în Whiteboard animation [18]

Acest lucru se datorează faptului că sursa de lumină se deplasează, deci lumina are de parcurs distanțe tot mai mari (de exemplu, dacă Soarele s-ar îndepărta de Pământ, atunci luminii solare i-ar lua mai mult de 8min pentru a ajunge la noi). Fie viteza de deplasare a lui Stelu astfel încât Geo să observe semnalele luminoase provenite de la el la intervale de timp de câte 12min (dublul intervalelor la care semnalele sunt transmise de pe navă). Dacă viteza cu care nava revine către sol este aceeași, atunci semnalele luminoase vor fi recepționate la intervale de timp de câte 3min (lumina are de parcurs distanțe din ce în ce mai mici). Așadar, Geo va observa:

$$10 \text{ semnale} \cdot 12 \text{ min} = 120 \text{ min} \text{ pentru călătoria dus, și:}$$

$$10 \text{ semnale} \cdot 3 \text{ min} = 30 \text{ min} \text{ pentru călătoria retur.}$$

În total, Geo măsoară un total de $120\text{min} + 30\text{min} = 150\text{min}$.

Dacă ne mutăm perspectiva pe navă, vom înregistra:

$$10 \text{ semnale} \cdot 6 \text{ min} = 60 \text{ min} \text{ pentru călătoria dus și}$$

$$10 \text{ semnale} \cdot 6 \text{ min} = 60 \text{ min} \text{ pentru călătoria întors}$$

În total, Stelu măsoară un interval de timp de **120min**. Rezultă o diferență de 30min între indicațiile cronometrelor de pe Pământ, respectiv, de pe nava spațială.

b) Analizând semnalele luminoase emise de către Geo, de pe Pământ, din punctul de vedere al lui Stelu, vom avea:

- pentru călătoria dus, $60 \text{ min} = 12 \text{ min} \cdot 5 \text{ semnale}$

- iar la întors, $60 \text{ min} = 3 \text{ min} \cdot 20 \text{ semnale}$, adică un total de **120min**.

Din punctul de vedere al lui Geo, observăm că el a emis un total de 25 de semnale, deci cronometrul său arată: $25 \text{ semnale} \cdot 6 \text{ min} = 150 \text{ min}$, adică o durată de 1h și 30 min, aceeași diferență ca și în cazul a)!

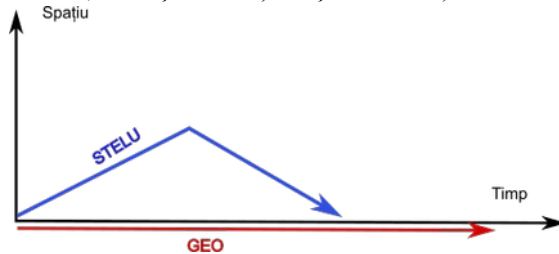


Fig. 2.21 - „Călătoriile” în spațiu-timp ale celor doi frați. Se observă că, chiar dacă cei doi au parcurs aceeași distanță în spațiu-timp, Geo s-a „deplasat” mai mult pe axa timpului decât fratele său.

Pe lângă explicația aceasta, o altă explicație intuitivă este cea dată de Edwin F. Taylor și John A. Wheeler [31] conform căreia, orice corp călătorește prin spațiu-timp cu o viteză constantă. Astfel, în timp ce Geo călătorește doar prin timp, Stelu călătorește în timp și spațiu, motiv pentru care el va „rămâne în urmă” față de fratele său dacă este să ne referim la deplasarea pe axa timpului (vezi Fig. 2.21).

II.3.4. „Paradoxul garajului” prezentat cu ajutorul Whiteboard Animation [19]

O altă consecință a Postulatelor Teoriei relativității în care viziunea noastră despre realitate este pusă la încercare, este așa-numitul „Paradox al garajului” [32 - 34]. Esența problemei este următoarea: un corp rigid care în condiții de repaus sau nerelativiste are aceeași lungime ca un alt corp în care primul poate intra, în condiții relativiste nu mai încapă în acesta. Din punct de vedere al observatorului legat de garaj, mobilul suferă o contracție relativistă Lorentz și va apărea mai mic decât în realitate, deci mobilul va încapă fără probleme în garaj. Din punct de vedere al observatorului legat de mobil, pentru acesta garajul se mișcă, deci acesta va suferi o contracție relativistă. Prin urmare, mobilul nu ar trebui să încapă în garaj. De aici și esența paradoxului. Matematica implicată este destul de simplă – formula contracției lungimilor a lui Lorentz:

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{L_0}{\gamma} \quad (\text{II.22})$$

Aplicând aceeași formulă odată din punct de vedere al observatorului și apoi din punct de vedere al mobilului, pentru fiecare dintre acestea corpul observat (mobilul, respectiv, garajul) va apărea contractat, ceea ce poate părea paradoxal. În realitate, paradoxul izvorăște din faptul că gândirea noastră este formată pe viziunea clasică asupra timpului și spațiului [33] și datorită presupunerii pe care o facem în mod involuntar, cum că atât partea din față și cea din spatele mobilului se vor găsi simultan în garaj [35]. Acest lucru este valabil în situații nerelativiste, dar atunci când vorbim despre fenomene care se petrec cu viteze foarte mari, ideea noastră față de simultaneitate trebuie să se schimbe, așa cum am arătat mai devreme.

În cazul considerat [19], evenimentele au loc în preajma zilei de naștere a pământeanului Geo care invită la petrecere pe prietenul său, extraterestrul Cosmo. Cosmo acceptă bucuros invitația, dar este preocupat de situația noului și

costisitorului său vehicul spațial pe care nu știe unde-l va parca. Geo îi propune să introducă vehiculul în garajul său care are exact aceeași lungime (Fig. 2.22.a). Pornind cu viteză apropiată de cea a luminii, Cosmo observă garajul mișcându-se și, datorită contracției relativiste, acesta pare mai mic, deci vehiculul nu va încăpea înăuntru. Contactat de către Cosmo, Geo observă vehiculul mai scurt decât în realitate, deci consideră că acesta ar trebui să încapă și să mai rămână și loc (Fig. 2.22b). Aceste două puncte de vedere diferite conduc la o situație paradoxală. Se pune întrebarea, cine are dreptate și cine se înșală?

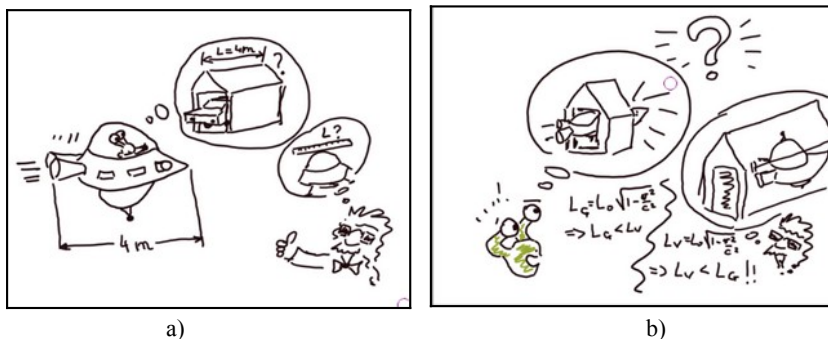


Fig. 2.22 – Prezentarea paradoxului garajului în Whiteboard animation:

a) compararea lungimilor vehiculului și a garajului în sistemele de referință proprii duc la concluzia că ele sunt egale; b) datorită contracției Lorentz, cele două dimensiuni apar în mod paradoxal diferite (preluat [19])

În literatura de specialitate, au fost propuse mai multe modalități de a explica această situație paradoxală. Prima face apel la relativitatea simultaneității [33 - 35]. Plasându-ne în sistemul de referință al garajului, în momentul (A) în care vehiculul atinge cu partea anterioară peretele din spate al garajului, extremitatea posterioară a acestuia se găsește în același moment (B) în interiorul garajului. Acest lucru se datorează contracției relativiste și înseamnă că, din acest punct de vedere, cele două extremități ale vehiculului se găsesc simultan în interiorul garajului – evenimentele (A) și (B) sunt simultane. Însă, dacă schimbăm sistemul de referință și ne mutăm în cel al lui Cosmo, garajul va apărea contractat. Prin urmare, atunci când vehiculul atinge partea din spate a garajului, extremitatea posterioară a vehiculului încă se află în afara garajului (starea C – vezi Fig. 2.23). Cu alte cuvinte, dacă Geo ar închide ușa garajului de îndată ce observă că vehiculul a pătruns integral în garaj, Cosmo ar avea de obiectat că Geo

trânțește ușa garajului în vreme ce partea din spate a vehiculului nu se află înăuntru. Conform postulatelor lui Einstein, momentele/ stările B și C nu sunt simultane, așadar ordinea evenimentelor diferă în funcție de sistemul de referință. Conform relativității simultaneității, ambii eroi ai poveștii au dreptate.

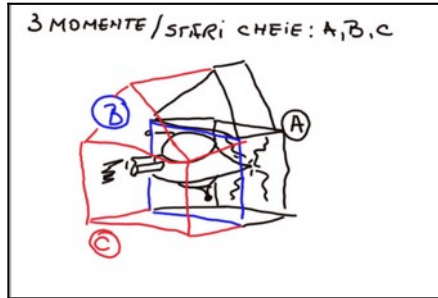


Fig. 2.23 – Prima explicație a paradoxului garajului cu
Whiteboard animation (preluat [19])

O a doua explicație se referă la faptul că însăși rigiditatea corpurilor este relativă [33]. Astfel, un corp care este rigid într-un anumit sistem de referință, își pierde această calitate în condiții relativiste. Putem spune despre un corp că este rigid atunci când informații legate de schimbarea stării de mișcare a unui punct aparținând corpului sunt transmise instantaneu întregului corp. Astfel, această idee despre rigiditate intră în conflict cu relativitatea simultaneității și cu imposibilitatea transmiterii instantanee a informației, adică cu o viteză mai mare decât viteza luminii. În lumina acestor considerații, noțiunea de corp rigid are sens doar în condițiile Fizicii clasice în cadrul căreia simultaneitatea are caracter absolut și nu există impedimente în a vorbi despre transmiterea informației cu viteze infinite.

Ce se întâmplă cu vehiculul lui Cosmo din această perspectivă? Atunci când vehiculul lovește peretele din partea din spate a garajului informația privind acest eveniment începe să se propage prin vehicul sub forma undelor elastice cu viteza sunetului. Așadar, acele puncte ale vehiculului care nu au primit informația privind impactul, vor continua să se miște, lucru care duce la compresia vehiculului. Astfel, partea din spate a vehiculului nu numai că va atinge intrarea în garaj, dar, datorită acestei compresii, ar trebui să o depășească. Pe de altă parte, din punct de vedere al unui punct din partea posterioară a vehiculului (îl vom nota cu B), el va intra în garaj atunci când compresia este deja destul de avansată. Bara

de protecție din partea din față a vehiculului (o vom nota cu A), lovind zidul garajului și oprindu-se, a schimbat deja sistemul de referință, nu se mai află în mișcare față de Pământ. Lungimea mobilului nu va mai fi aceeași cu lungimea proprie L_0 (vezi Fig. 2.24).

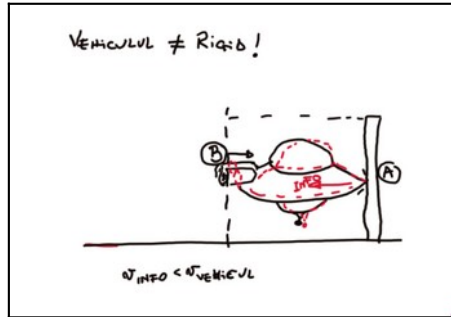


Fig. 2.24 – Relativitatea rigidității corpului prezentată în Whiteboard animation (preluat [19])

Toate aceste explicații pot fi foarte dificil de înțeles de către elevi, dar cu ajutorul abordării conceptuale și a instrumentului *Whiteboard animation* aceste dificultăți pot fi depășite. *Whiteboard animation* vorbește elevilor folosind un limbaj și reprezentări pe care aceștia le pot înțelege și, ca urmare, înlesnește introducerea unui capitol foarte complex al Fizicii la nivel liceal și nu numai.

II.4. Concluzii privind predarea calitativă a noțiunilor de Fizică utilizând Whiteboard Animation

Dintre avantajele utilizării acestei metode enumerăm următoarele [17 - 19]:

În primul rând, prezentarea poate fi rulată ori de câte ori este necesar; prin urmare ne putem asigura că elevii au înțeles fenomenul fizic. După o primă vizionare fără întreruperi, având o imagine de ansamblu asupra poveștii, se poate relua vizionarea și întrerupe în momentele cheie pentru explicații, discuții, întrebări și răspunsuri, astfel încât noțiunile prezentate să fie înțelese cât mai bine.

În al doilea rând, este o metodă simplă care, utilizând desene simple, schematice, duce la o atenție sporită din partea elevilor și o mai ușoară înțelegere a noțiunilor prezentate. Este cunoscut că percepția mediului înconjurător se bazează pe multiple tipare. Făcând apel la astfel de tipare vizuale, *Whiteboard Animation* poate facilita procesul de învățare [15].

Nu în ultimul rând, fiind o metodă creativă, *Whiteboard Animation* stimulează creativitatea și imaginația elevilor.

Așadar, consider că o abordare de acest fel vine în sprijinul elevilor, oferindu-le un nou punct de vedere asupra modului în care poate fi studiată Fizica.

Alături de *Whiteboard animation* am utilizat un alt instrument care ajută elevii să sintetizeze și să ordoneze conceptele fundamentale de Fizică studiate. Este vorba de harta conceptuală. Astfel, utilizarea hărților conceptuale s-a dovedit foarte utilă în prezentarea noțiunilor fundamentale referitoare la mișcările periodice: mișcarea circulară uniformă și mișcarea oscilatorie uniformă [36, 37], precum și noțiuni de bază de Seismologie [38]. Este o metodă care rezolvă provocările pe care le au profesorii în a răspunde nevoii explicării elevilor a unor noțiuni fundamentale de fizică avansată fără a recurge la tot bagajul matematic [27, 39, 40]. Harta conceptuală completează *Whiteboard animation* deoarece, în vreme ce *Whiteboard animation* ajută la transmiterea de cunoștințe, harta conceptuală ajută atât la sintetizare cât și la evaluarea cunoștințelor de Fizică.

CAPITOLUL III

Argumentarea experimentală a abordărilor STEM în învățarea noțiunilor de Fizică în liceu

III.1. Contextualizarea folosirii experimentului în învățarea Fizicii

Fizica este o știință care are fundamentele sprijinite pe experiment. Lucrările de laborator sau lucrările practice dezvoltă elevilor multiple abilități și le creează o atitudine științifică în explicarea fenomenelor din natură, din viața de zi cu zi. Acestea sunt motivele principale pentru care orice abordare STEM trebuie să conțină și o parte experimentală.

Laboratoarele virtuale sau cele în care sunt folosite dispozitive alternative, la a căror realizare să participe și elevii, încurajează învățarea de la colegi. De asemenea, poate fi o metodă foarte eficientă de a-i învăța pe elevi despre grafice – cum se construiesc și cum pot fi interpretate. Feedback-ul imediat poate transforma foarte rapid abstractul în concret. Laboratoarele virtuale pot fi un ajutor pentru elevii care se tem de studiul științelor – utilizând astfel de laboratoare în care nu este nimic de stricat iar manipularea instrumentelor este foarte simplă și intuitivă, elevii pot să capete curaj și să abordeze mai încrezători laboratoarele reale și studiul Fizicii.

Voi prezenta în continuare două exemple de abordări alternative legate de experiment: studiul pendulului Kater, în care am căutat adaptarea unor noi metode de culegere a datelor mai ușor de utilizat de către elevi și care să reprezinte, pe de altă parte, o provocare pentru aceștia [42], și o lucrare de laborator virtual, dată fiind dificultatea obținerii aparatului necesare studiului seismologic într-o școală și, de asemenea, dificultatea manevrării acestei aparaturi și a interpretării datelor de către persoane care nu sunt bine pregătite în acest domeniu [43].

III.2. Studiul experimental al pendulului Kater utilizând instrumente noi, adaptate unor abordări STEM [42]

Am propus o abordare nouă a studiului pendulului Kater, folosind două modalități de a colecta datele experimentale: cu ajutorul unui dispozitiv construit pe baza unei platforme Arduino și cu ajutorul programului de analiză video

Tracker. *Arduino* este o platformă electronică *open-source* care beneficiază de o largă comunitate de utilizatori [44]. Chiar dacă nu a fost destinat inițial experimentelor de fizică acesta poate fi adaptat și utilizat de către elevi în diferite contexte de înțelegere și implementare a experimentelor de fizică [45 - 50]. *Tracker Video Analysis and Modeling Tool* (pe scurt, *Tracker*) este un program construit pentru analiză video. Acesta poate fi descărcat gratuit de pe platforma *Open Source Physics (OSP)* și poate rula pe toate sistemele de operare (Windows, MacOS, Linux). *Tracker* a fost folosit cu rezultate foarte bune în diferite experimente, de la cele cu interes academic până la unele mult mai complexe. Acest program permite elevilor să modeleze și să analizeze mișcările diferitelor corpuri folosind înregistrări video [51 - 54].

III.2.2. Dispozitiv experimental și modul de lucru [42]

Pendulul reversibil folosit în experimentul descris aici constă într-o bară metalică de-a lungul căreia pot culisa două bușe metalice A și B (Fig. 3.3). Acestea au o masă neglijabilă comparativ cu masa barei metalice. Prin deplasarea bușelor se modifică distanțele dintre punctele de sprijin și centrul de greutate, notate mai devreme cu l_1 și l_2 .

În timpul experimentului, una dintre bușe este menținută în aceeași poziție iar cealaltă a fost deplasată din centimetru în centimetru, modificând astfel distanța dintre bușe. Pentru fiecare poziție se scoate pendulul din poziția de echilibru și este lăsat să oscileze. Apoi se schimbă punctul de sprijin.

În acest fel, pentru fiecare valoare a distanței dintre bușe pendulul oscilează, o dată sprijinindu-se pe bușa fixă și apoi pe bușa mobilă. Cuțitele pe care se așează bușele reprezintă centrul de oscilație al pendulului. Pentru ca oscilațiile să fie mici, la unghiuri de sub 6° , am montat un limitator care nu permite deplasarea barei mai mult decât cea corespunzătoare unghiului respectiv. Fiecare bușă prezintă niște fante astfel încât ea se poate așeza pe un cuțit suport fix (punctul de sprijin), frecarea fiind mult redusă. Pentru o imagine mai bună, am simplificat detaliul înlăturând din figură partea de suport care se interpune între observator și ansamblul bușă-cuțit de sprijin (Fig. 3.4).

Pentru măsurarea perioadei de oscilație am folosit două alternative: un senzor de radiații infraroșii conectat la un dispozitiv *Arduino* și, concomitent, am filmat mișcarea pendulului. Filmele rezultate au fost analizate cu ajutorul programului *Tracker Video Analysis*. În Fig. 3.5., este prezentat dispozitivul

experimental cu evidențierea celor două metode de măsurare a perioadei oscilațiilor pendulului.

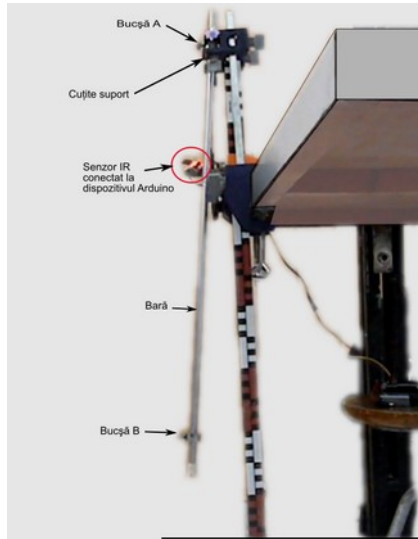


Fig. 3.3– Dispozitiv experimental pentru studiul pendulului Kater. Imaginea este captată prin intermediul camerei foto utilizate pentru înregistrarea video a experimentului (prelucrată și adaptată [42]).

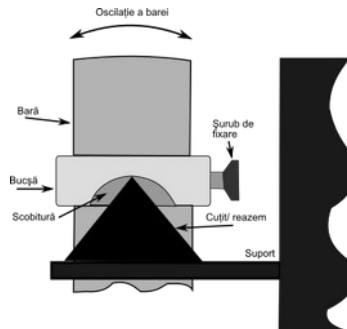


Fig. 3.4– Detaliu simplificat al dispozitivului experimental cu bucșă care se sprijină pe suportul cuște pentru reducerea frecărilor și înlesnirea mișcării oscilatorii

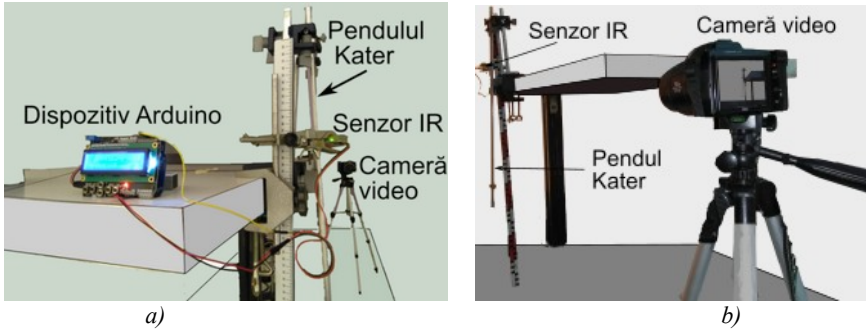


Fig. 3.5 – Dispozitivul experimental: a) pendulul Kater și dispozitivul Arduino; b) pendulul Kater și camera video pentru analiza video cu programul Traker (prelucrate și adaptate [42])

III.2.3. Măsurarea perioadei de oscilație a pendulului cu ajutorul platformei electronice Arduino [42]

Arduino este, în principiu, o placă de bază care, primind un semnal extern, de la un senzor, buton, mesaj, transformă acest semnal într-o ieșire care poate fi: o comandă către un motor, mesaje către periferice precum ecrane LCD, difuzoare, LED-uri etc. Acțiunile dispozitivului sunt controlate cu ajutorul unui panou de comandă (Fig. 3.6). Mai departe, datele culese au fost transmise la un computer unde au fost înregistrate și analizate.

În cazul experimentului de față, ca semnal de intrare am folosit semnalele venite de la un detector de radiații din domeniul infraroșu (IR) bazat pe un TSOP (*Thin Small Outline Package*) (Fig. 3.7).



Fig. 3.6 – Dispozitivul Arduino cu ecranul LCD și panoul de control atașate [42]

Dispozitivul Arduino este programat să înregistreze atât timpii în care există semnal, adică atunci când bara pendulului trece prin fața detectorului, cât și

intervalele de timp în care nu există semnal, adică atunci când pendulul nu se află în fața detectorului. Însușind acești timpi găsim perioada de oscilație dacă senzorul este plasat la una dintre extremitățile traiectoriei pendulului aflat în mișcare oscilatorie.

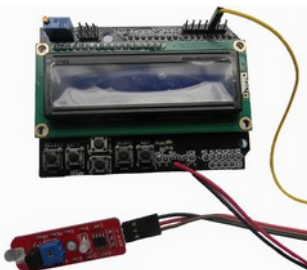


Fig. 3.7 – Senzor IR cu dispozitiv TSOP conectat la dispozitivul Arduino echipat cu ecran LCD și panou de comandă [42]

Principiul de funcționare al senzorului se observă în Fig. 3.8. Același dispozitiv de măsurare a perioadei de oscilație a fost folosit și pentru un montaj experimental destinat studiului dinamic al torsiunii. Rezultatele, ca și în cazul de față au fost foarte bune [55]. În acest caz, a fost măsurată perioada de oscilație a unui pendul de torsiune.

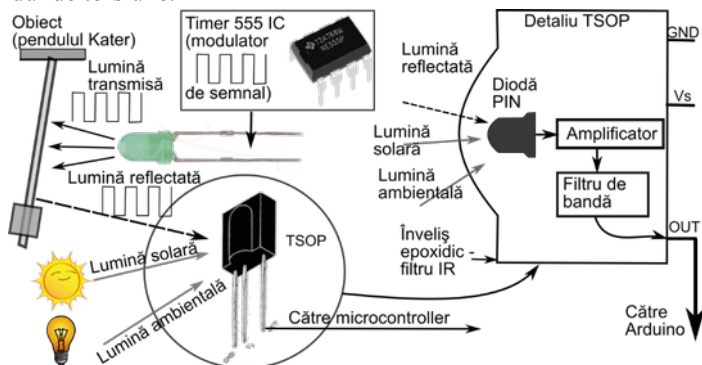


Fig. 3.8 – Schema de funcționare a detectorului de IR cu TSOP atașat platformei Arduino (prelucrat și adaptat [42])

Numărul de oscilații înregistrate de dispozitiv a fost de 30 – un număr suficient de mare pentru a asigura, prin mediere, o valoare a perioadei de oscilație cât mai apropiată de realitate. Au fost efectuate două seturi de măsurători: prima

când bușca notată în Fig. 3.3 cu litera A este mobilă și cea notată cu B este fixă. Pendulul a fost pus în mișcare oscilatorie o dată în jurul lui A și apoi în jurul lui B. Astfel, atunci când bușca fixă B este centrul de oscilație obținem perioada T_1 , iar atunci când oscilația se face în jurul bușcii mobile A, se obține perioada de oscilație T_2 . În decursul experimentului bușca mobilă a fost mutată pe distanțe de câte 1 cm. După fiecare deplasare a bușcii A s-au realizat cele două măsurători. Dependența perioadei de oscilație de distanța dintre bușce pentru cele două situații este prezentată în Fig. 3.9.

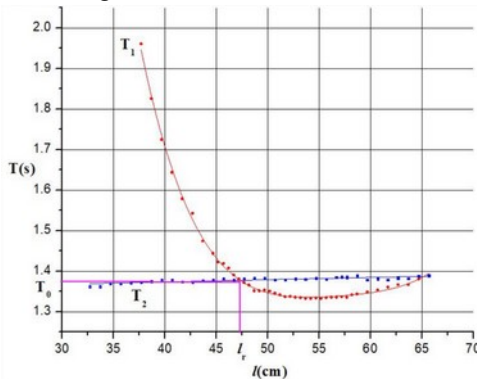


Fig. 3.9 – Dependența perioadelor de oscilație T_1 și T_2 de distanța dintre bușce obținută folosind datele culese de dispozitivul Arduino [42]

Graficul a fost construit folosind programul pentru reprezentări grafice Origin [56]. Intersecția dintre cele două grafice (curbele fitate) ne dă lungimea redusă a pendulului, l_r , și, corespunzător, perioada T_0 . Valorile obținute sunt: $T_0=1.377s$, $l_r=47.33cm$. Folosind aceste valori găsim pentru accelerația gravitațională valoarea $g=9.84m/s^2$. În urma acestui rezultat, precum și a celui obținut în lucrarea [55], putem concluziona că, dispozitivul de detectare și măsurare a perioadei de oscilație bazat pe platforma Arduino poate înlocui cu succes înregistratoarele clasice folosite în laboratoarele de Fizică.

III.2.4. Măsurarea perioadei de oscilație a pendulului cu ajutorul programului de analiză video Tracker [42]

Tracker este un program gratuit și *Open Source* creat pentru a facilita urmărirea corpurilor aflate în mișcare, filmate în prealabil, precum și de modelare

[57]. Printre principalele facilități ale programului amintim: urmărirea obiectelor, aceasta putând fi automată sau manuală, cu date despre poziție, viteze și accelerații; urmărirea centrului de masă (reducerea corpului la un punct material) și compunerea unor vectori caracteristici mișcării. În continuare voi demonstra că *Tracker* este și un instrument suficient de precis, care poate fi utilizat cu succes în laboratorul de Fizică.

În cazul pendulului Kater, mișcarea acestuia făcându-se cu viteze destul de mici, am folosit pentru filmarea mișcării o cameră video obișnuită fără caracteristici tehnice foarte performante (30 *fps*, rezoluție de 1280x720 pixeli). Folosind același dispozitiv experimental despre care am discutat și același mod de lucru, am filmat mișcarea pendulului.

Odată realizat, materialul video a fost importat în programul *Tracker*. Singurele pregătiri necesare au fost marcarea lungimii de referință (calibrarea distanțelor), stabilirea originii sistemului de coordonate și însemnarea punctului material de urmărit. Originea sistemului de coordonate corespunde centrului de oscilație (punctului de suspensie), iar punctul urmărit este cel marcat pe bușca din partea de jos, aceea care oscilează.

Odată stabilit punctul material care trebuie urmărit, programul îi determină automat, cadru după cadru, poziția atât pe axa verticală cât și pe cea orizontală. Cunoscând rata de derulare a filmului (30 de cadre pe secundă), sunt calculate și afișate în mod automat mai multe mărimi precum coordonatele, componentele vitezei, unghiul de deviere față de verticală și multe altele. Nu este necesar să afișăm de la început toate mărimile fizice; programul le păstrează în memorie și oricând se poate apela la aceasta (se pot afișa și mărimi suplimentare). Concomitent cu operațiunea de urmărire a punctului stabilit, se completează datele din tabel și se trasează curbele mărimilor fizice alese pentru a se reprezenta grafic.

În cazul experimentului nostru, cea mai interesantă mărime de determinat este unghiul de deviație θ a barei față de verticală. În condițiile micilor oscilații, acesta trebuie să fie mai mic decât 6° . Într-o primă fază, se poate construi un grafic al unghiului de deviere θ în funcție de timp pentru a verifica dacă într-adevăr mișcarea este una periodică. Din acest grafic poate fi determinată și perioada oscilației. Concomitent cu procesul de urmărire, datele obținute sunt trecute automat în tabel și se construiește graficul mărimii fizice alese, în funcție de timp. Odată încheiată operațiunea de urmărire, în tabel sunt conținute datele

brute și graficele asociate. În Fig. 3.12., apar graficele proiecției poziției pendulului pe axa Ox și unghiul de deviație în funcție de timp.

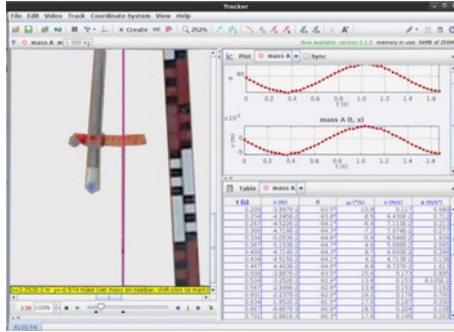


Fig 3.12 – Captură de ecran a programului Tracker arătând tabelul de date (timp, poziția pe axa Ox, unghiul de deviație θ , viteza unghiulară, viteza, accelerația) și două grafice asociate: $x=f(t)$ și $\theta=f(t)$ [42]

Datele obținute în acest fel au fost prelucrate în mod asemănător celui descris în partea III.2.3, obținându-se graficul din Fig. 3.13. La fel cum am procedat anterior, din intersecția celor două grafice rezultă coordonatele acestui punct important, care reprezintă lungimea redusă, $l_r=47.47cm$ și perioada $T_0=1.381s$. Folosind ecuația (3.13) se obține pentru accelerația gravitațională o valoare $g=9.81m/s^2$. Din nou, o valoare foarte apropiată de cea cunoscută și, de asemenea, de cea obținută folosind dispozitivul Arduino.

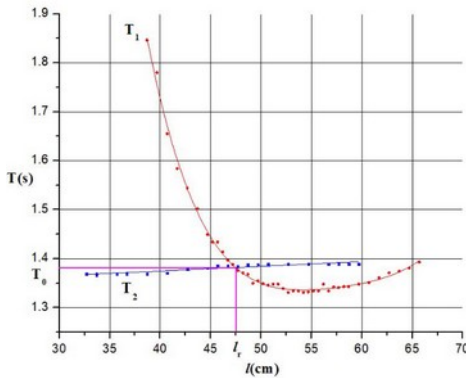


Fig. 3.13 – Dependența perioadelor de oscilație T_1 și T_2 de distanța dintre bușe obținută cu programul Tracker [42]

Aceeași metodă a fost utilizată pentru determinarea perioadei de oscilație a unui pendul de torsiune [58]. Și în acest caz, rezultatele obținute au fost foarte aproape de cele determinate cu instrumente de laborator destinate exact acestui lucru, ceea ce constituie, din nou, o validare a metodei utilizate.

Pentru a vedea cât sunt de apropiate valorile obținute prin cele două metode, Tracker și Arduino, în Fig. 3.14., am suprapus graficele perioadelor funcție de distanțele dintre bușe pentru cele două instrumente de extragere a datelor experimentale. Se poate observa o suprapunere aproape perfectă. Acest lucru, la care se adaugă valorile foarte bune obținute pentru accelerația gravitațională, demonstrează validitatea ambelor metode de lucru.

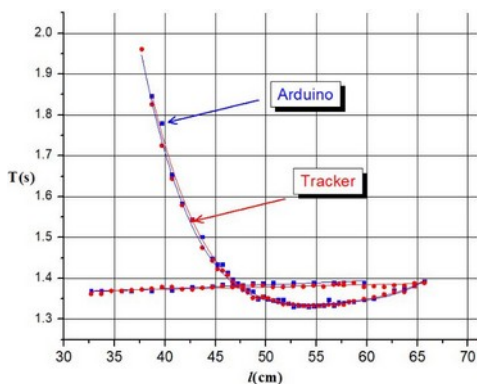


Fig. 3.14 – Suprapunerea graficelor perioadelor de oscilație funcție de distanțele dintre bușe, construite pe baza datelor obținute prin cele două metode: Arduino (culoarea albastră) și Tracker (culoarea roșie). Punctele și curbele sunt foarte apropiate [42].

III.2.5. Concluzii ale studiului experimental al pendulului Kater

În cadrul acestui subcapitol am analizat posibilitatea adaptării unor instrumente alternative de laborator pentru lucrări practice de mecanică. Lucrarea experimentală a vizat determinarea accelerației gravitaționale cu ajutorul pendulului Kater, iar instrumentele alternative utilizate pentru determinarea perioadei de oscilație a pendulului au fost un detector IR conectat la o platformă Arduino și analiza video, realizată folosind programul Tracker. După cum am arătat, rezultatele obținute au fost foarte bune, ambele metode constituind alternative viabile pentru instrumentarul de laborator. Ambele instrumente facilitează o abordare STEM în cadrul orelor de Fizică, dezvoltând și alte

cunoștințe și competențe decât cele strict legate de cunoștințele de Fizică. Într-adevăr, în cazul dispozitivului Arduino, el poate fi realizat chiar cu ajutorul elevilor. Pentru aceasta, ei vor dezvolta, pe lângă abilitățile și cunoștințele legate de studiul mișcării oscilatorii, și cunoștințe de electronică pentru a înțelege funcționarea senzorului sau de programare pentru punerea în funcțiune a dispozitivului Arduino. În ceea ce privește utilizarea analizei video cu ajutorul programului Tracker și aici găsim câteva avantaje. Este o metodă foarte ușor de aplicat. Oricine are la dispoziție o cameră video sau un telefon mobil cu care să filmeze oscilațiile, după care poate să introducă datele în programul Tracker - care este unul gratuit. În plus, metoda poate fi folosită și ca laborator la distanță. Elevii pot primi înregistrările video ale experimentului și le pot analiza singuri. Un alt avantaj legat de Tracker este că, pe lângă mărimile fizice utilizate strict la determinările de laborator, elevii pot să observe și valorile altor mărimi fizice, să construiască grafice, să observe conexiunile dintre diferitele mărimi fizice, ceea ce constituie o lărgire a orizontului lor de cunoaștere.

III.3. Determinarea magnitudinii unui cutremur folosind o aplicație GeoGebra [43]

III.3.1. Importanța studierii noțiunilor de seismologie în școli și metode studiu

O abordare care se bucură de o popularitate crescândă în cadrul orelor de Fizică o reprezintă laboratoarele virtuale. Seismologia este un domeniu în care o abordare virtuală este o soluție. Principalul motiv pentru care o abordare virtuală este de preferat uneia *hands on* este aceea că aparatura necesară studierii cutremurelor este destul de costisitoare, instalarea ei necesită condiții speciale, instrumentele sunt foarte delicate, iar citirea și interpretarea înregistrărilor necesită o bună pregătire de specialitate

Pentru a ușura înțelegerea de către elevi a noțiunilor de seismologie, utilizând programul GeoGebra, am realizat o aplicație cu ajutorul căreia, pornind de la modele simplificate de seismograme, elevii să poată determina magnitudinea unui cutremur. Cu ajutorul unor seismograme simplificate, elevii pot înțelege mecanismul de transmitere a undelor seismice și modul în care acestea sunt resimțite în teritoriu.

III.3.2. Magnitudinea unui cutremur și scara Richter

Faimoasa scară Richter, utilizată în toată lumea, a fost concepută în anul 1935 de către cel al cărui nume îl poartă. Magnitudinea pe scara Richter poate fi determinată măsurându-se intervalul de timp dintre undele primară (P) și secundară (S) (intervalul S-P) și amplitudinea undei S. Aceste valori sunt introduse în nomogramă. Intervalul S-P este pus în legătură cu distanța epicentrală iar amplitudinea poate fi citită direct din seismogramă, așa cum este arătat în Fig. 3.15 și, mai departe, în Fig. 3.18.

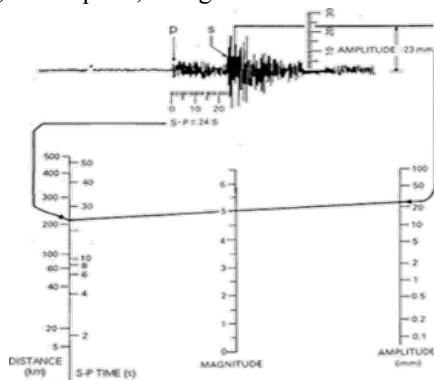


Fig. 3.15 – Nomograma magnitudinii (Richter Gutenberg) cu explicații despre cum pot fi utilizate în practică datele dintr-o seismogramă [59]

Utilizând aceste date putem determina magnitudinea cutremurului pe baza nomogramei Richter Gutenberg trasând un segment de dreaptă care să unească punctul care indică distanța epicentrală (axa din stânga Fig. 3.15) cu punctul care indică amplitudinea undei S (axa din partea dreaptă a Fig. 3.15). Punctul în care acest segment intersectează axa mediană ne arată magnitudinea cutremurului.

III.3.3. Aplicație GeoGebra construită pentru determinarea magnitudinii unui cutremur [43]

GeoGebra este un program gratuit, *Open Source*, care poate rula sub orice sistem de operare (Windows, Linux, MacOS) și pe orice tip de dispozitiv folosit în educație: computer, tabletă, telefon inteligent.

Pentru realizarea aplicației care ne ajută să determinăm magnitudinea unui cutremur am parcurs pașii următori. Am stabilit ca imagine de fundal harta

cu rețeaua seismică a României oferită gratuit de Institutul Național de Fizică a Pământului (INFP) [60]. Pentru aplicația noastră am ales un cutremur care are Epicentrul în zona Carpaților de Curbură (marcat pe hartă în Fig. 3.16) și trei stații situate la distanțe diferite de zona epicentrală și, de asemenea, în zone geografice și geologice diferite.

În Fig. 3.16, fiecare stație seismică este marcată cu o casetă binară care, odată bifată, oferă următoarele informații: seismograma corespunzătoare stației respective, un cursor pentru introducerea distanței epicentrale, un cursor pentru introducerea amplitudinii undei S și un întrerupător care declanșează trasarea segmentului de dreaptă care rezolvă magnitudinea. Alături de hartă, în partea stângă, se observă nomograma în care, așa cum spuneam mai devreme, axa din stânga este pentru distanța epicentrală, axa din dreapta pentru amplitudinea undei S, iar axa centrală este pentru magnitudine. Stațiile seismice alese sunt: Cluj (indicativ – CJR), Cernavodă (CVD) și Drobeta Turnu Severin (RMGR).

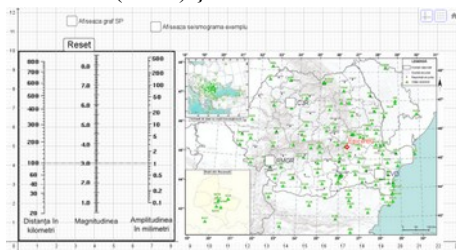


Fig. 3.16 – *Imaginea de start a aplicației (prelucrat și adaptat [41, 43]).*

În pagina de start a aplicației din Fig. 3.16., se mai observă două butoane: unul care permite afișarea graficului distanței epicentrale funcție de intervalul de timp S-P și unul care permite afișarea seismogramei, exemplu (Fig. 3.18). Graficul intervalului de timp S-P funcție de distanța epicentrală a fost realizat pe baza datelor publicate de Institutul Român de Seismologie Aplicată pe pagina web proprie [61]. În Fig. 3.18., este prezentată seismograma model, adusă în prim plan prin bifarea butonului din partea de sus a ecranului de start. Cu ajutorul acestora sunt prezentate principalele informații care pot fi extrase dintr-o seismogramă. De notat faptul că este vorba de un model ideal, mult simplificat, seismograma reală având liniile mult mai suprapuse, fără distincții nete între diferitele tipuri de unde.

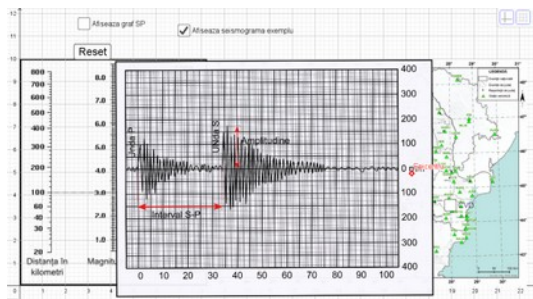


Fig. 3.18 – Seismograma model care este utilizată pentru a prezenta elevilor principalele informații oferite de o seismogramă [43].

A fost demonstrată o dependență liniară a distanței epicentrale de intervalul S-P, $\delta=11.21 \cdot \Delta t$. Pe baza unui grafic, elevii determină distanța epicentrală pe baza seismogramei. După ce li se explică principalele noțiuni teoretice și modul de lucru, elevii pot trece la determinările efective. Folosind butoanele corespunzătoare fiecărei stații seismice, ei pot aduce în prim plan seismogramele corespunzătoare acestora (Fig. 3.21). Amplitudinea A se determină direct pe seismogramă. Aceste valori sunt obținute cu ajutorul cursoroarelor (Fig. 3.21). Mișcând cursorul corespunzător distanței δ , dCJR în partea dreaptă, punctul corespunzător de pe axa din nomogramă se mișcă și el. Același lucru îl putem face și pentru amplitudine. În momentul în care considerăm că avem valorile corecte, bifând butonul „Tras cjr” este trasat segmentul de dreaptă care unește punctul corespunzător distanței epicentrale și cel corespunzător valorii amplitudinii. Locul în care acest segment intersectează axa centrală ne dă magnitudinea cutremurului (Fig. 3.22). Procesul poate fi repetat și pentru celelalte stații.

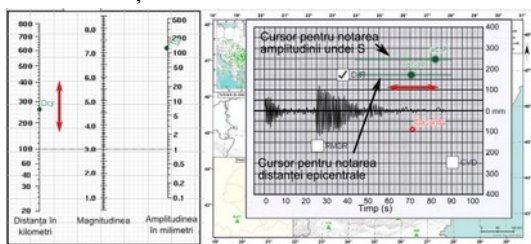


Fig. 3.21 – Informația adusă în prim plan prin bifarea butonului corespunzător stației seismice CJR. Săgețile duble arată corespondența dintre valoarea notată pe cursor și punctul corespunzător pe nomogramă (prelucrat și adaptat [43]).

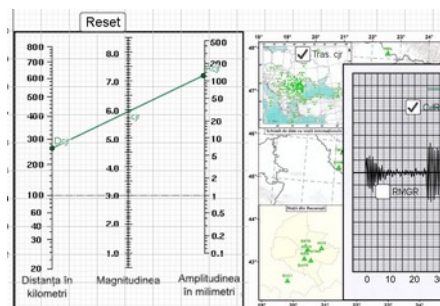


Fig. 3.22 – Segmentul de dreaptă care unește punctul corespunzător distanței epicentrale (D_{cjr}) cu cel corespunzător cu cel corespunzător amplitudinii (A_{cjr}). Conform exemplului luat, magnitudinea este de 5,9 grade (prelucrat și adaptat [43]).

O altă aplicație pe care am creat-o cu ajutorul programului GeoGebra și care se referă tot la domeniul seismologiei este legată de determinarea coordonatelor epicentrului unui cutremur prin metoda razelor [62].

Ambele aplicații au rolul de a deschide noi perspective în ceea ce privește laboratoarele virtuale. Pe lângă faptul că pune la dispoziție elevilor instrumente și noțiuni care altfel sunt greu de accesat, aplicațiile realizate în programul GeoGebra mai au și alte valențe, pe lângă cele folosite în mod direct. Este vorba de faptul că există posibilitatea vizualizării de către elevi a aparatului matematic din spatele determinărilor respective și a modului în care aplicația este construită.

CAPITOLUL IV

Integrarea învățării STEM pentru studiul dinamicii fluidelor

IV.1. Introducere – puterea vântului și importanța studierii sale de către elevi

IV.1.1. Puterea vântului. Scurt istoric al utilizării puterii vântului.

Încă din cele mai vechi timpuri, oamenii au reușit cu ingeniozitate să utilizeze elementele naturii pentru a-și face viața mai ușoară. Unul dintre elementele naturale omniprezente este vântul care, uneori, în mișcarea sa transportă mari cantități de energie. Utilizarea acestei surse de energie a fost firească pentru oameni.

Principiul de funcționare a unei mori de vânt nu s-a schimbat foarte mult din antichitate până în prezent; prin utilizarea unor materiale moderne s-au obținut performanțe superioare.

Principiul de funcționare a unei centrale eoliene este simplu – transformarea energiei cinetice în energie electrică cu ajutorul unui generator (Fig. 4.9):

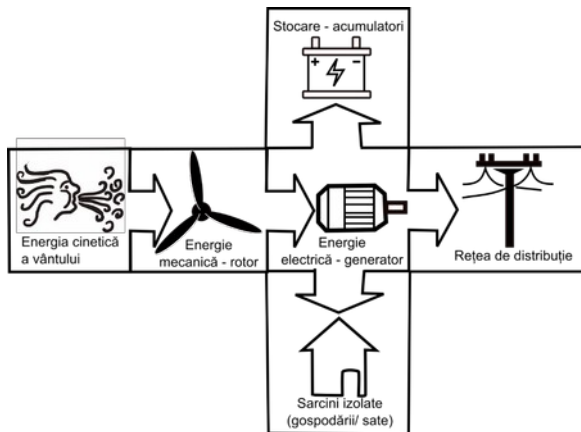


Fig. 4.9 – Conversia energiei cinetice a vântului în energie electrică

IV.1.2. Puterea vântului. Considerații teoretice.

Limitările turbinelor eoliene au fost calculate de către Betz [65 - 68]. După cum putem observa în Fig. 4.13., vântul, care are inițial viteza v_1 , este încetinit după trecerea prin planul paletelor turbinei la valoarea v_3 .

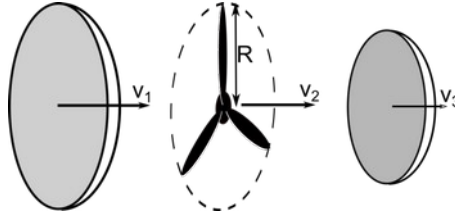


Fig. 4.13 – Vitezele vântului înainte, după și în planul elicei turbinei eoliene:
 v_1 =viteza vântului înainte de turbină, v_2 =viteza vântului în planul elicei turbinei,
 v_3 =viteza vântului în spatele planului elicei turbinei

$$\dot{E}_c = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \left[\frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_3}{v_1} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right) \right] \quad (IV.9)$$

În ecuația (IV.9) $\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v_1^3$ reprezintă *puterea vântului* și $\frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_3}{v_1} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right]$

reprezintă *coeficientul de putere* c_p .

Astfel, puterea vântului este multiplicată cu factorul c_p dependent de raportul v_3/v_1 .

Valoarea maximă a coeficientului de putere se obține atunci când viteza vântului v_1 (în fața rotorului) este redusă la $v_3=v_1/3$ (după ce trece de rotor/ planul paletelor). Valoarea aceasta a fost determinată fie din grafic, fie egalând derivata ecuației (IV.9) funcție de raportul (v_3/v_1) cu zero.

$$c_{[P, Betz]} = \frac{16}{27} = 0.59 \quad (IV.14)$$

Întrucât în lucrarea de față discutăm despre studiul fluidelor cu aplicație directă la turbinele eoliene la nivel de liceu, considerăm că fenomenele implicate în funcționarea turbinelor cu ax orizontal sau a celor cu ax vertical bazate pe portanță sunt mult prea complexe. În prezent, mecanica fluidelor nu se mai studiază la nivel liceal, deci elevii nu au nici măcar rudimentele teoriei pentru înțelegerea acestor fenomene. Totuși, într-o abordare integrată STEM, discutarea fenomenelor implicate în funcționarea turbinelor cu ax vertical sunt mai aproape

de puterea lor de înțelegere și de cunoștințele de Fizică, Matematică sau inginerii acumulate.

Pentru turbinele cu ax vertical în care este folosită forța de tracțiune (în literatura de specialitate *Drag force*), pornim de la expresia forței manifestate asupra unei suprafețe plane [64]:

$$D = c_D \frac{\rho}{2} a v^2 \quad (\text{IV.15})$$

Se observă că această forță de tracțiune este proporțională cu aria suprafeței expuse vântului și cu pătratul vitezei acestuia. De asemenea, un factor important care influențează această forță este coeficientul aerodinamic de tracțiune c_D , care depinde de forma suprafeței respective. După cum se observă în Fig. 4.15, forța de tracțiune produce un moment care tinde să rotească corpul în jurul axei de rotație.

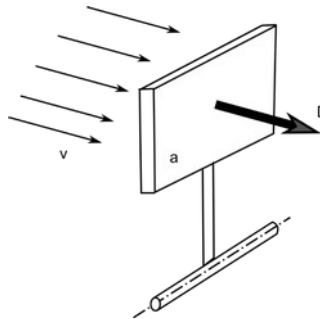


Fig. 4.15 – Forța de tracțiune pe o placă plană (preluat și adaptat [64])

După o abordare a unui laborator virtual în care studiem comportarea diferitelor forme geometrice sub influența vântului, dublat de o verificare a acestuia în laboratorul real [69] am realizat simulări ale comportării unor modele simple de turbine folosind un tunel aerodinamic virtual [70], după care am construit și testat în laborator un kitt experimental bazat pe aceleași modele simple [71]. Toate acestea pot constitui modele de activități ce pot fi realizate cu elevii.

IV.1.3. Energia eoliană în context educațional

Piața de construcție, instalare și exploatare a turbinelor eoliene este într-o continuă creștere, ceea ce duce și la un necesar de personal calificat în domeniu.

Dat fiind contextul actual, este de dorit să încurajăm studiul energiei vântului la nivel liceal. Pe lângă aspectul practic, care constă în acumularea de cunoștințe și atitudini privind producerea și utilizarea energiei electrice cu ajutorul turbinelor eoliene, elevii vor putea aprofunda noțiuni de mecanica fluidelor, domeniu foarte important și complex din studiul Fizicii.

IV.1.4. Studiul dinamicii fluidelor la nivel liceal în context STEM

După cum am precizat mai devreme, studiul mecanicii fluidelor este un domeniu subestimat în prezent în cadrul preuniversitar. De ani buni, mecanica fluidelor nu mai există în programa de Fizică pentru liceu, iar la nivel gimnazial se studiază doar câteva noțiuni de statica fluidelor – legea lui Pascal și legea lui Arhimede. Totuși, domeniul este foarte actual, important și cu aplicații practice imediate – energia eoliană, cu perspective de creștere și dezvoltare foarte mare în anii care vin. Chiar dacă elevii de liceu nu au pregătirea teoretică pentru a opera cu noțiunile complexe pe care le presupune studiul dinamicii fluidelor, există, totuși, două instrumente care pot da o idee despre ce se întâmplă și să trezească interesul elevilor pentru o aprofundare a studiilor din acest domeniu: analiza computerizată (în literatura de specialitate *Computational Fluid Dynamics – CFD*) și activitățile practice. O îmbinare a acestora poate duce la o înțelegere din punct de vedere calitativ a fenomenelor care au loc și la familiarizarea cu un domeniu deosebit de interesant al Fizicii.

IV.1.5. Abordarea complexă, de la virtual la real, a studiului mecanicii fluidelor prin intermediul turbinelor eoliene

Chiar dacă, după cum arătam anterior, *CFD (Computational Fluid Dynamics)* este o abordare destul de accesibilă și ușor de implementat, totuși, ea nu poate înlocui complet și celelalte aspecte – cel teoretic și cel al experimentului efectiv.

În continuare voi prezenta câteva activități și instrumente care pot fi integrate în activități de învățare în care să se împletească noțiunile teoretice, laboratoarele virtuale și activitățile practice cu scopul ca elevii să înțeleagă mai bine fenomenele care țin de Mecanica fluidelor și modul în care energia vântului poate fi utilizată în beneficiul oamenilor [69 - 71].

IV.2. Utilizarea unui tunel aerodinamic virtual în studiul comportării diferitelor profile sub influența vântului [69, 70]

În cazul studiului fluidelor programul COMSOL Multiphysics [74, 75] este un instrument deosebit de puternic oferind o largă paletă de modele, aplicații și posibilități de a studia comportamentul diferitelor sisteme în care este implicată mecanica fluidelor. În studiul pe care-l propun în continuare [69, 70], am folosit programele COMSOL Multiphysics și FreeCAD pentru crearea unui tunel aerodinamic virtual și a obiectelor studiate cu ajutorul acestuia.

IV.2.1. COMSOL Multiphysics și FreeCAD – instrumente folosite pentru dezvoltarea unui tunel aerodinamic virtual [69, 70]

COMSOL Multiphysics este un program care dezvoltă modele matematice cu intenția de a ajuta cercetarea în domeniile Fizicii și ale ingineriilor [74, 75]. Programul are o interfață grafică foarte intuitivă și oferă posibilitatea utilizatorului fie de a folosi o introducere ghidată pe baza unor modele fizice des utilizate, dar și de a controla modelarea introducând ecuații sau condiții noi, după dorință.

Pentru mai multă rapiditate, am ales folosirea ghidului (*wizard*); acesta introduce automat modelul fizic dorit, ales dintr-o listă. Am lucrat într-un spațiu tridimensional. În cazul folosirii unui computer cu performanțe mai slabe sau atunci când situația o permite, se poate lucra și în două dimensiuni [75, 76].

Apoi, se alege modelul fizic. Există o bogată paletă de opțiuni, fiecare dintre ele descrisă în partea dreaptă, ecuațiile din spatele studiului modificându-se odată cu modificarea modelului. Pentru studiul propus am ales o curgere laminară, guvernată de ecuația Navier-Stokes. Ultima alegere ce trebuie făcută în acest stadiu al construirii tunelului aerodinamic virtual se referă la tipul de studiu, dacă acesta să fie staționar sau dependent de timp. Detaliile referitoare la implicațiile alegerii sunt afișate tot în partea dreaptă a ecranului. Am ales studiul staționar, întrucât valorile mărimilor fizice la intrare (viteza vântului și presiunea atmosferică) nu variază în timp. Odată făcute toate opțiunile preliminare, precum model fizic, tipul de studiu (static/dinamic), modelul grafic etc. care se vor regăsi în zona de definire a parametrilor fizici și a modelului, trecem la pagina de lucru.

Există posibilitatea creării mai multor componente care pot fi ulterior cuplate. Am folosit o singură componentă, fiind suficientă pentru studiul propus, atât privitor la comportarea unor forme geometrice simple [69] cât și a unor

modele de turbine [70] în tunelul aerodinamic virtual. Pentru definirea și analiza completă a unei astfel de componente trebuie completate următoarele subcomponente: Definiții (*Definitions*) în care sunt adoptate diferite opțiuni grafice, modul de afișare a coordonatelor etc. Al doilea element este *Geometry* în care se construiesc sau se importă elementele geometrice necesare. Înainte de construirea elementelor geometrice se alege unitatea de măsură în care se lucrează. În cazul de față, datorită dimensiunilor reduse ale modelelor studiate ulterior în laborator, am ales exprimarea lungimilor în milimetri. Pentru construirea tunelului aerodinamic am început cu construirea unei incinte paralelipipedice (*block*), cu dimensiunile 300x200x200(mm) (Fig. 4.24). Acesta va deveni, după definirea altor parametri, corpul tunelului aerodinamic.

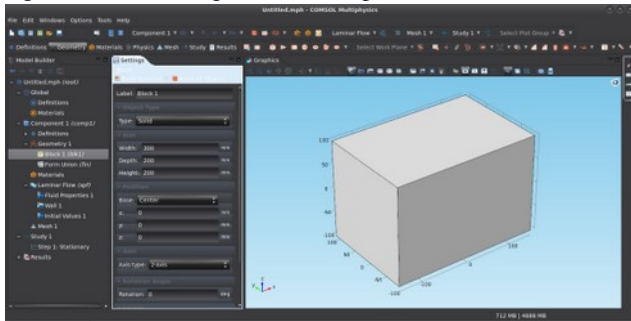


Fig. 4.24 – Construirea corpului tunelului aerodinamic

Pentru ilustrarea modului de construire și utilizare a tunelului aerodinamic am introdus în interiorul tunelului o sferă solidă care va reprezenta un obstacol în calea curentului de aer din tunel. În Fig. 4.25, folosind opțiunea de transparentizare a pereților tunelului, se poate observa interiorul acestuia, cu și fără corpul adăugat în interior. De menționat că, până în acest punct am utilizat instrumentul de construcții geometrice propriu programului COMSOL. Există posibilitatea construirii corpurilor geometrice într-un program de tip CAD – *Computer-Aided Design* (AutoCAD [77], Solidworks [78] sau FreeCAD [79]) și importul acestei forme în spațiul de lucru COMSOL, așa cum se va vedea mai departe [70]. Chiar dacă utilizarea instrumentului destinat construcțiilor geometrice integrat în COMSOL Multiphysics este mai simplă și mai rapidă, în cazul formelor mai complexe, precum turbinele eoliene, un program tip CAD oferă un mai bun control asupra caracteristicilor constructive ale obiectului sau a comportării acestuia. De exemplu, în cazul studiului formelor geometrice simple,

sau al turbinelor eoliene, se poate controla unghiul sau orientarea obiectului față de direcția vântului. Acest lucru este mai dificil de realizat direct în COMSOL Multiphysics.

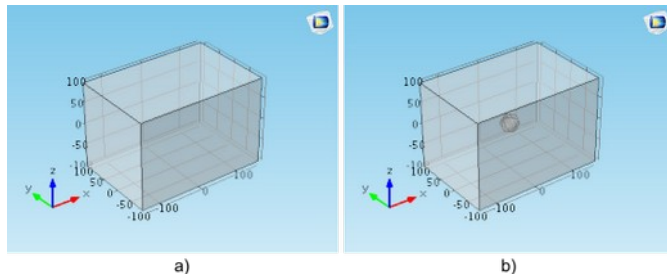


Fig 4.25 – Detaliu al tunelului aerodinamic – a) gol; b) cu corpul sferic în interior.

Odată construite tunelul și obiectul în studiu sau importarea acestuia din urmă, pasul următor este definirea materialelor. Pentru aceasta se pot alege materiale din lista prestabilită sau se pot introduce materiale noi. În cazul de față, pentru materialul din incinta tunelului aerodinamic am ales, natural, aerul, iar pentru obiectul din interior un solid, de exemplu, aluminiul.

După atribuirea materialelor urmează definirea modelului fizic. Întrucât am urmat la început definirea ghidată a mediului de lucru, deja modelul general este stabilit – curgere laminară. Pe lângă acest cadru general, mai sunt de făcut și alte reglaje: intrarea în tunel – *Inlet* - cu valoarea vitezei vântului ce poate fi modificată după dorință, ieșirea din tunel – *Outlet* – cu specificarea implicită că presiunea la ieșire să fie zero, pentru a evita obstrucționarea curgerii aerului și pereții exteriori ai tunelului aerodinamic – *Symmetry*.

Ultima etapă a pregătirilor modelului este definirea rețelei (*mesh*). Nodurile acestei rețele permit discretizarea geometriei în unități elementare de forme simple numite elemente de rețea (*mesh elements*). În cazul nostru, al studiului 3D, am folosit elemente de rețea tetraedrice, cu dimensiuni adaptate corpurilor folosite. Dacă pentru formele geometrice simple nu este nevoie de rețele foarte fine, atunci când studiem corpuri mai complexe [70] datorită distanțelor mici de la îmbinări a fost nevoie de definirea unor elemente foarte fine. În Fig. 4.28 este prezentat tunelul aerodinamic virtual după crearea rețelei.

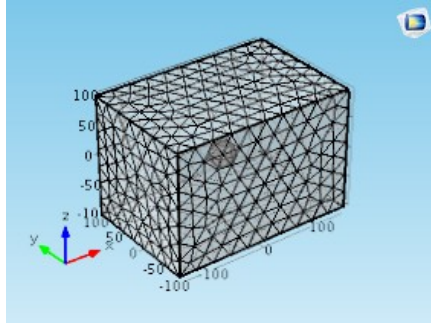


Fig. 4.28 – Rețeaua (mesh) tetraedrală construită în tunelul aerodinamic virtual

Odată făcute toate aceste setări, aplicația este gata pentru a prelucra datele. Durata calculului depinde de mai mulți factori, printre care complexitatea acestora, dimensiunile elementelor de rețea (*mesh*), dar și de puterea de calcul a computerului. Odată încheiată compilarea datelor, se obțin rezultatele brute. Programul oferă implicit prezentarea valorilor vitezelor pe cinci niveluri/felii sectionate din volumul incintei (Fig. 4.29).

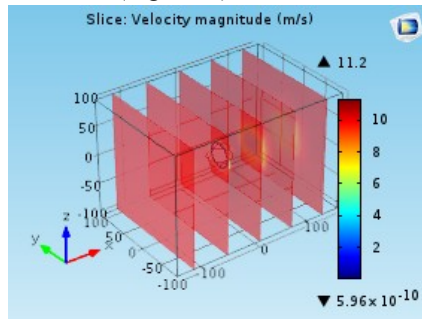


Fig. 4.29 – Rezultatul implicit al compilării

Se poate observa că figurii îi este atașată o legendă a culorilor corespunzătoare valorilor vitezei. Acestea variază de la roșu închis, corespunzătoare unei viteze a vântului de 11.2m/s la albastru închis, corespunzătoare unei viteze aproape de zero ($5.96 \times 10^{-10} \text{m/s}$). Așadar, se poate face o primă analiză din punct de vedere calitativ și cantitativ. Aceste rezultate pot fi rafinate astfel încât ele să poată fi mai ușor de interpretat. De exemplu, se poate

face o analiză plan cu plan, deplasând planul vizibil pas cu pas, la fel cum se face o analiză la tomograf (Fig. 4.30).

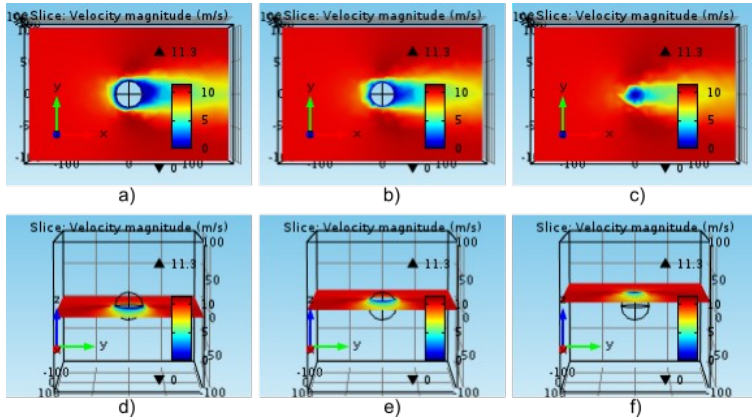


Fig. 4.30 – Deplasarea planelor de analiză a valorilor vitezelor:
a)-c) - Vedere de sus; d)-f) – Vedere laterală

În Fig. 4.31., se pot observa traiectoriile particulelor dintr-un plan și modul în care acestea sunt deviate de obstacol. Un alt parametru care poate fi analizat este presiunea atmosferică și în special valorile acesteia la suprafața corpului obstacol, pentru a determina ulterior forța de apăsare exercitată de aer asupra acestei suprafețe. Asemănător câmpului vitezelor poate fi obținut câmpul presiunilor pe diverse plane (Fig. 4.32).

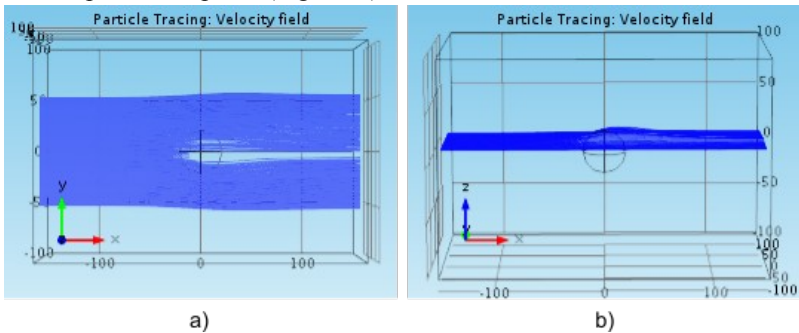


Fig. 4.31 – Imaginea traiectoriilor particulelor de aer:
a) vedere de sus; b) vedere laterală.

De menționat că în imaginea 4.32 valorile presiunii sunt raportate la presiunea atmosferică. Planele de studiu pot fi modificate, de asemenea, așa cum am făcut-o și în cazul vitezelor, deci se poate obține o imagine pe secțiuni, ca la tomograf. În plus, se poate trasa o hartă a valorilor presiunii exercitate de curentul de aer pe suprafața obiectului (Fig. 4.33) cu ilustrarea liniilor de egală presiune, asemănătoare cu curbele de nivel din hărțile geografice. Numărul de curbe este la dispoziția utilizatorului.

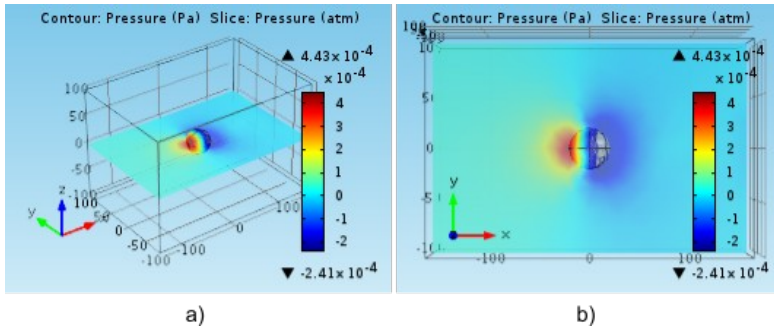


Fig. 4.32 – Câmpul presiunilor într-un plan median:
 a) vedere de ansamblu; b) vedere de sus

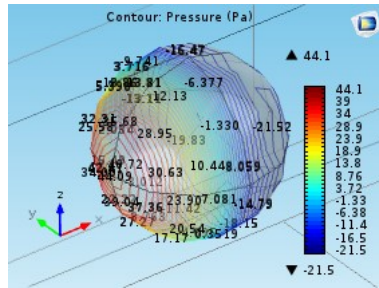


Fig. 4.33 – Harta liniilor de egală presiune de pe suprafața obstacolului.
 Presiunea este exercitată de curgerea aerului.

Pentru analize cantitative, există, de asemenea, o largă paletă de opțiuni. De exemplu, în cazul studiilor pe care le-am realizat, am studiat forțele de apăsare exercitate de vânt pe suprafețele diferitelor obiecte și, în cazul turbinelor, momentul forței raportat la axa centrală, în jurul căreia se rotește turbina [70].

Forța normală la suprafață este obținută prin integrarea presiunii pe suprafața sferei (comanda *Surface integration*), iar rezultatul este afișat în tabelul

din partea dreapta-jos a ecranului. Valorile din tabel pot fi exportate și prelucrate cu programe de calcul de tip Excel. În partea centrală, panoul *Settings*, se pot observa suprafețele selectate pentru integrare, comanda/formula specifică utilizată (*spf.T_stressx*), unitatea de măsură a mărimii obținute. Avantajul programului este că, exceptând funcțiile automate, utilizatorul poate introduce funcții noi, adaptate nevoilor sale, lucru pe care l-am făcut în cadrul determinării momentelor forțelor exercitate asupra aripilor turbinelor [70].

Un alt program foarte util în studiile care implică tunelul virtual este FreeCAD [79]. Acesta este un program de modelare 3D *open-source* a cărui funcție primară este de a desena obiecte reale de orice dimensiune. Toate construcțiile sunt parametrice, ceea ce înseamnă că desenatorul are un control deplin asupra mediului de lucru prin parametrii pe care trebuie să-i cunoască, să-i stăpânească și să-i utilizeze.

Un mare avantaj al programului FreeCAD este că imaginile construite cu ajutorul său pot fi exportate în formate (.step, .stl) compatibile atât cu COMSOL, adică pot fi aduse și studiate în tunelul aerodinamic virtual, dar și cu imprimanta 3D. În acest fel, aceleași prototipuri de turbine au fost studiate atât în spațiul virtual cât și în condiții de laborator putând fi observată o comportare similară. Acest lucru constituie o confirmare a valabilității metodei de studiu bazate pe programul COMSOL Multiphysics și pe tunelul aerodinamic virtual construit cu ajutorul său. Pentru realizarea formelor simple (placă dreptunghiulară, disc etc.), am folosit facilitățile programului COMSOL Multiphysics, iar pentru cele mai complicate, inclusiv modelele de turbine, am folosit programul FreeCAD [69 - 71].

IV.2.2. Comportarea unor forme geometrice simple din punct de vedere aerodinamic studiată în tunelul virtual [69].

Un prim pas în studiul propus în acest capitol, după prezentarea unor elemente teoretice este studierea unor forme geometrice simple în tunelul aerodinamic virtual [69].

În construirea corpurilor simple [69], am ținut cont și de asigurarea compatibilității cu formele existente în kit-ul de laborator, astfel încât să obținem date în paralel: din mediul virtual și din mediul real. Astfel, dacă pentru studiul calitativ în mediul virtual am mers pe trei forme geometrice: disc, pătrat și triunghi, pentru studiul cantitativ, kit-ul experimental neavând în dotare o plăcuță triunghiulară, au rămas doar formele de disc și pătrat.

Primele rezultate ale simulării, calcularea vitezelor și presiunii dinamice în întregul volum al aerului din incinta tunelului și de la suprafața obstacolului, prilejuiesc o analiză calitativă a câmpului presiunilor și al vitezelor (Fig. 4.36 – 4.38). În Fig. 4.36., sunt ilustrate vederi de ansamblu ale câmpurilor presiunilor pentru trei forme geometrice: disc, pătrat și triunghi. Pentru o imagine mai detaliată, în Fig. 4.37., avem vederi de sus ale aceluiași plane.

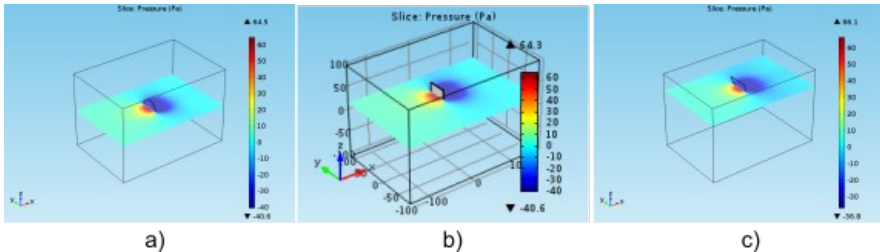


Fig. 4.36 – Câmpul presiunilor, vedere generală. a) disc; b) pătrat; c) triunghi [69]

După cum se poate observa, în pozițiile din Fig. 4.37., imaginile câmpurilor presiunilor sunt foarte asemănătoare, lucru care era de așteptat, dată fiind simetria figurilor. Totuși, mutând planul de-a lungul figurii geometrice se vor putea observa diferențe semnificative – în timp ce pentru pătrat câmpul presiunilor rămâne aproximativ identic, pentru disc și triunghi există modificări datorate formei geometrice (Fig. 4.38).

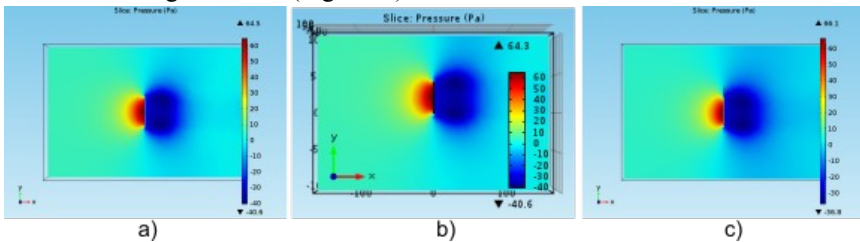


Fig. 4.37 – Câmpul presiunilor, vedere de sus: a) disc; b) pătrat; c) triunghi [69]

O primă observație calitativă care reiese din toate aceste imagini este aceea că în fața obstacolelor presiunea dinamică este mai mare decât presiunea atmosferică, valori ilustrate prin culori de la roșu la galben, în timp ce în spatele obstacolelor se formează câmpuri de depresiune ilustrate prin nuanțe de albastru.

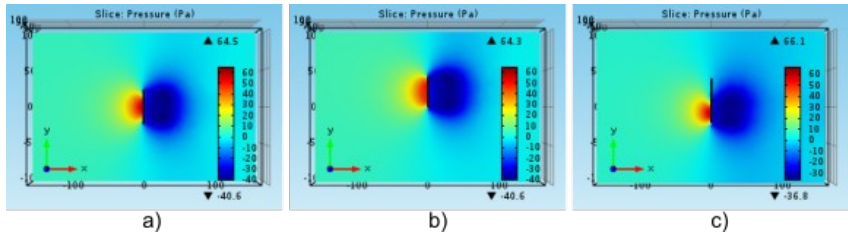


Fig. 4.38 – Câmpul presiunilor, vedere de sus cu schimbarea planelor presiunii:
a) disc; b) pătrat; c) triunghi.

Tot calitativ, pot fi analizate și câmpurile vitezelor (Fig. 4.40). Pe lângă valorile vitezelor, după cum spuneam și mai devreme, putem observa și traiectoriile particulelor de aer și modul în care acestea interacționează cu suprafețele corpurilor. Astfel, în Fig. 4.40., sunt reprezentate și traiectoriile particulelor cu linii de culoare deschisă.

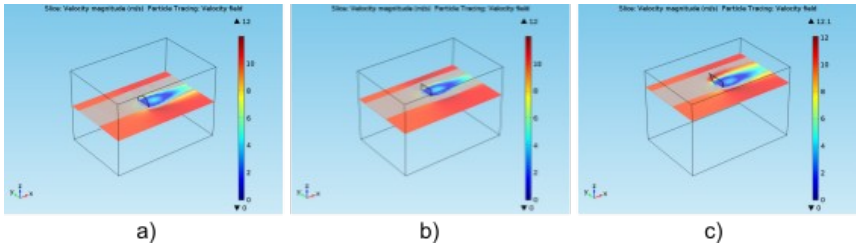


Fig. 4.40 – Câmpul vitezelor și traiectoriile particulelor de aer:
a) disc; b) pătrat; c) triunghi.

La fel ca în cazul studiului câmpului presiunilor, putem avea și o imagine de sus (Fig. 4.41).

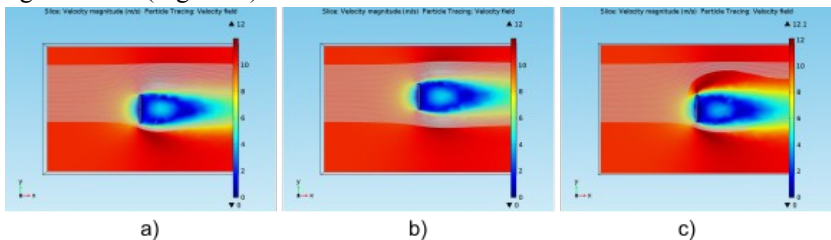


Fig. 4.41 – Câmpul vitezelor și traiectoriile particulelor de aer, vedere de sus:
a) disc; b) pătrat; c) triunghi.

Pe lângă toate aceste observații calitative, se pot determina o serie de mărimi fizice. În cazul de față, putem calcula coeficientul aerodinamic al tracțiunii. Pornind de la formula IV.15,

$$c_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} v^2 a} \quad (\text{IV.38})$$

unde c_D este coeficientul aerodinamic de tracțiune, D forța de tracțiune (forța exercitată de vânt perpendicular pe suprafața obiectului), $\frac{\rho v^2}{2}$ este presiunea dinamică, iar a este aria suprafeței corpului. Acest coeficient diferă de la un corp la altul în funcție de suprafața expusă vântului. În cazul experimentului, fie el virtual sau real, se determină forța de tracțiune D , presiunea dinamică și din graficul forței funcție de presiunea dinamică calculăm coeficientul aerodinamic de tracțiune c_D . Astfel, forța de tracțiune se determină utilizând funcția specifică programului COMSOL:

$$D = -\text{reacf}(u) \quad (\text{IV.39})$$

iar pentru presiunea dinamică:

$$p_d = \text{spf} . \text{rho} * u^2 * 1/2 \quad (\text{IV.40})$$

Valorile vitezelor vântului au fost alese între 8 și 10 m/s, astfel încât să avem aceleași valori ca în cazul experimentului de laborator.

De asemenea, dimensiunile corpurilor au fost alese astfel încât ele să corespundă cu cele din dotarea laboratorului: discul are o rază de 12,4 mm, iar pătratul o latură de 15 mm. Ambele plăcuțe au o grosime de 1 mm. Valorile forței de tracțiune și ale presiunii dinamice corespunzătoare au fost exportate și pe baza lor au fost ridicate graficele forței de tracțiune funcție de presiunea dinamică care pot fi văzute în Fig. 4.42. Calculând panta dreptei se determină coeficientul aerodinamic al tracțiunii, c_D . Pe baza determinărilor realizate cu ajutorul tunelului aerodinamic virtual am obținut valorile lui c_D egale cu 0,92 în cazul discului și 1,09 în cazul pătratului. Aceste valori sunt foarte apropiate de cele din literatura de specialitate. De exemplu, pentru o placă dreptunghiulară literatura dă ca valoare a coeficientului $c_D=1.1$ [64]. Prin urmare, am obținut o foarte bună concordanță între valorile determinate ale coeficientului aerodinamic de tracțiune și cele care apar în literatura de specialitate. În plus, stadiul următor al studiului urmează ca acest coeficient să fie determinat și pe cale experimentală.

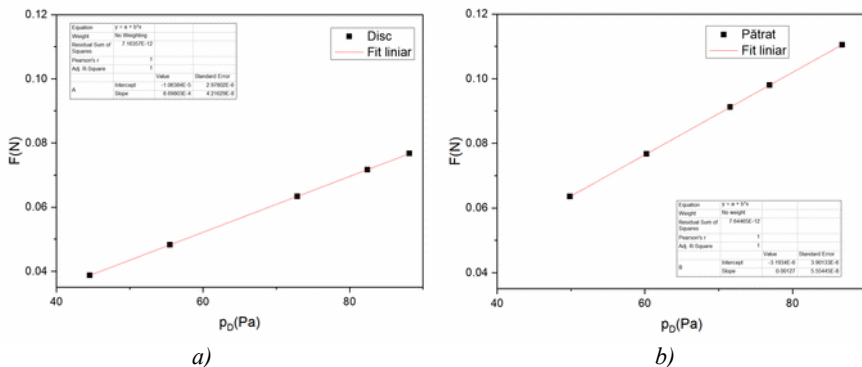


Fig. 4.42 – Graficele coeficienților aerodinamici de tracțiune funcție de presiunea dinamică: a) disc ($c_D=0.92$); b) pătrat ($c_D=1.09$)

IV.2.3. Studiul unor modele de turbine eoliene folosind tunelul aerodinamic virtual

Odată exersate abilitățile de a opera cu tunelul aerodinamic virtual și odată ce elevii s-au obișnuit cu programele COMSOL Multiphysics și FreeCAD, se poate trece la un studiu mai complex: proiectarea, realizarea și testarea unor prototipuri de turbine eoliene simple. Aceste prototipuri urmează apoi să fie construite cu ajutorul unei imprimante 3D și apoi să fie testate în condiții de laborator. Modelul de bază este unul foarte simplu: un tambur cilindric cu raza de 15 mm și înălțimea de 45 mm pe care se atașează trei aripi în forma unor triunghiuri dreptunghice cu catetele de 45 mm și o grosime de 0,15 mm. Aripile sunt dispuse la unghiuri de câte 120° una față de cealaltă cu una dintre catete de-a lungul generatoarei cilindrului (Fig. 4.43).

Pentru ca turbina să fie pusă și menținută în mișcare, este necesar ca:

$$\frac{W}{E_{crot}} > 1 \Leftrightarrow \frac{\overline{M} \cdot \omega}{E_{crot}} > 1 \Leftrightarrow \overline{M} > \frac{E_{crot}}{\omega} \quad (IV.55)$$

Aceasta este condiția ca turbina să funcționeze. Pentru situația noastră concretă vom folosi următoarele valori:

$R = L/3 = 15 \text{ mm} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ (din construcție; R este raza corpului turbinei, L este latura aripii)

$\rho = 1210 \text{ kg/m}^3$ (densitatea PLA; am ales acest material deoarece este utilizat la imprimarea 3D, deci, în cazul continuării studiului virtual cu unul real, s-ar putea folosi această metodă de construire a unui model) [80]

$$h = 1.5 \text{ mm} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m (grosimea aripilor)}$$

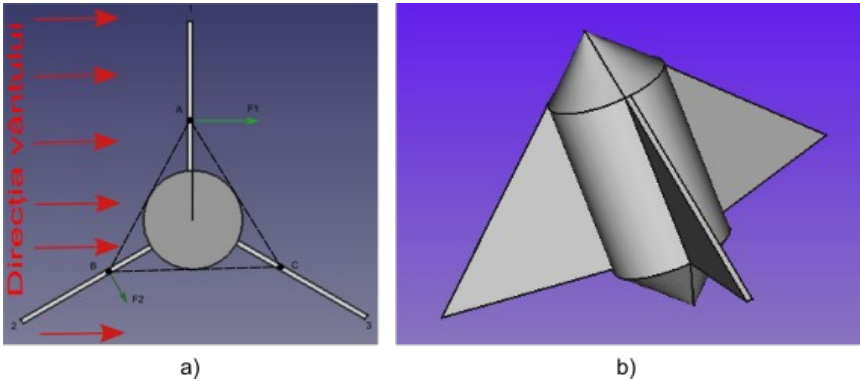


Fig. 4.43 – Modelul de bază al turbinei cu ax vertical
 a) vedere de sus; b) vedere laterală

S-a demonstrat mai devreme că raportul dintre viteza de rotație a aripilor

și cea a vântului este optim la valoarea $\lambda = \frac{\omega \cdot R_M}{v} \approx 0.16$. De aici, considerând

$$v = 10 \text{ m/s} \text{ și } R_M = 30 \text{ mm} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m} (R_M = R + L/3), \text{ rezultă că } \omega = \frac{1.6}{3 \cdot 10^{-2}} \approx 53 \frac{\text{rad}}{\text{s}}.$$

Folosind toate aceste valori, vom găsi pentru relația (IV.55):

$$\frac{E_{\text{crot}}}{\omega} = 3\rho R^4 \omega \left(\frac{\pi}{4} R + 9h \right) = 2.4623 \cdot 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}, \text{ deci, } \overline{M} > 2.4623 \cdot 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{IV.56})$$

Sigur că vorbim despre un model mult simplificat în care se neglijează frecarea sau vitezele relative ale aripilor. Calculul de mai sus are caracter strict orientativ pentru a obține o valoare de referință. În studiul modelelor de turbine vom analiza comportarea acestora sub influența vântului și vom calcula media momentelor forțelor la nivelul aripilor. Această valoare comparată cu valoarea de referință determinată mai sus ne va spune dacă este posibil ca turbina să funcționeze sau nu. O astfel de analiză este utilă pentru ca elevii să înțeleagă mecanismele de care trebuie să țină cont atunci când proiectează un astfel de dispozitiv.

După cum arătam mai devreme, proiectarea modelelor studiate pleacă de la forme simple – triunghi, cilindru, con. Un alt avantaj al utilizării formelor simple este acela că permite elevilor familiarizarea cu programul de proiectare FreeCAD. Pentru construirea modelului de bază, se pot urma etapele următoare:

1) Se pleacă de la construirea aripilor. Pentru aceasta, se construiește triunghiul cu parametrii dați, se transformă în suprafață plană (comanda *Face*), după care, folosind comanda *Extrude*, suprafeței i se adaugă grosimea potrivită (Fig. 4.45a). Am obținut în acest fel prima aripă.

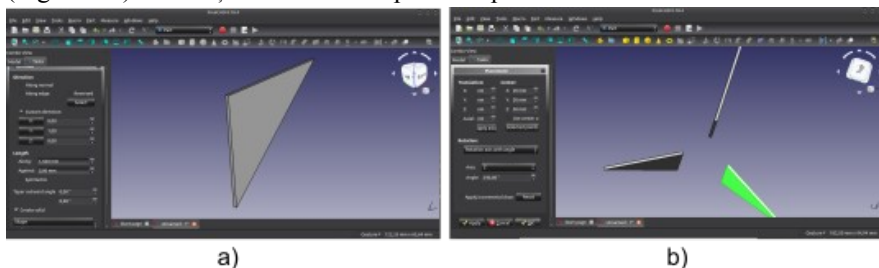


Fig. 4.45 – Construirea aripilor modelului de bază cu ajutorul programului FreeCAD: a) construirea unei aripi; b) cele trei aripi la unghiuri de câte 120° una față de cealaltă. [70]

2) Această primă aripă este copiată și multiplicată de două ori. Cele două copii sunt rotite cu un unghi de 120° și 240° față de poziția aripii originale, după cum se poate vedea în Fig. 4.45b.

3) Adăugăm și poziționăm corpul turbinei, tamburul cilindric. Folosind comanda *Union*, se sudează împreună cele patru elemente.

4) Pentru a asigura o formă aerodinamică se atașează la cele două capete ale cilindrului câte un con cu înălțimea de 15 mm, obținându-se modelul final (Fig. 4.47). Acesta poate fi exportat ca fișier .step pentru a fi importat în COMSOL sau .stl pentru a fi trimis la imprimanta 3D. Pentru aceasta, însă, se vor face câteva completări menite a permite atașarea modelului la rulmenții care să-i permită o rotație ușoară și montarea la suport. Vom reveni în partea experimentală cu aceste completări. Dar modelul de bază, până la pasul trei, este același.

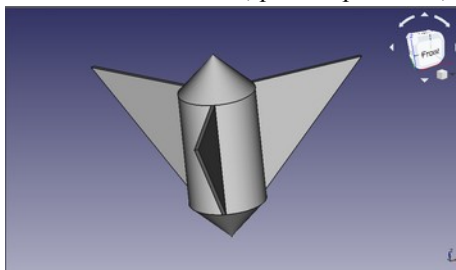


Fig. 4.47 – Modelul de bază în formă finală, gata de a fi utilizat în tunelul aerodinamic.

Am obținut în final trei prototipuri de turbine pe care să le studiem pentru început în tunelul aerodinamic virtual, cu ajutorul programului COMSOL Multiphysics, și apoi în condiții de laborator. Menționez, încă odată, că aceleași prototipuri, cu mici modificări, sunt folosite atât în studiul virtual cât și în cel de laborator. Modelele finale utilizate în studiul virtual sunt în Fig. 4.50.

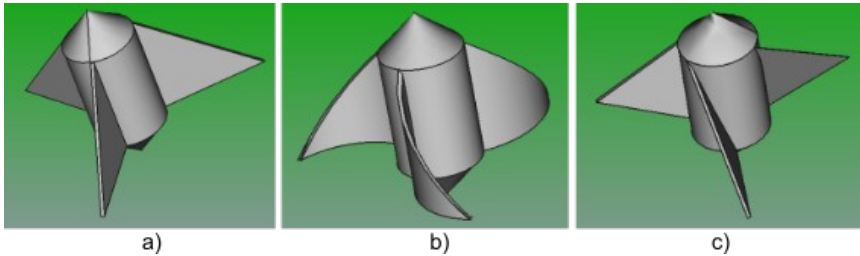


Fig. 4.50 – Cele trei modele de turbine utilizate în tunelul virtual:

a) model cu aripi drepte; b) model cu aripi curbate; c) model cu aripi înclinate [70].

Odată finalizate modelele de turbine, acestea sunt importate în programul COMSOL Multiphysics pentru analiză. Pașii urmați în pregătirea modelului pentru analiză au fost descriși în secțiunea IV.2.1. Fiecare model a fost rotit cu câte 15° față de axul central vertical, într-un interval de la 0° la 360° , și pentru fiecare dintre aceste poziții programul a compilat ecuațiile prezentate în secțiunea anterioară. Prin această rotire, am încercat simularea mișcării turbinei și analiza parametrilor care influențează funcționarea acesteia. Desigur că aproximarea este destul de departe de realitate, dar oferă informații prețioase ce pot fi utilizate mai departe. Am considerat unghiul β față de axa Oy , iar valoarea acestuia este zero atunci când prima aripă (a_1 din Fig. 4.52 și Fig. 4.53) este perpendiculară pe direcția vântului. O primă analiză care poate fi făcută este una calitativă. În funcție de dorință, putem analiza câmpul vitezelor, al presiunilor, sau putem urmări traiectoriile particulelor de aer în jurul turbinei (Fig. 4.51).

Pentru câmpurile vitezelor și presiunilor avem alături legendele culorilor, astfel încât, putem aprecia valorile vitezelor sau ale presiunilor în diferite puncte din spațiu sau de pe suprafața turbinei. Aceste valori pot fi afișate într-un tabel și exportate pentru o analiză aprofundată. În cazul traiectoriilor particulelor, analiza este una pur calitativă, dar putem face observații relevante privind comportarea curenților de aer pe diferite niveluri în jurul obstacolului. Aceste observații pot duce mai departe la îmbunătățiri ale profilului aerodinamic al obiectului.

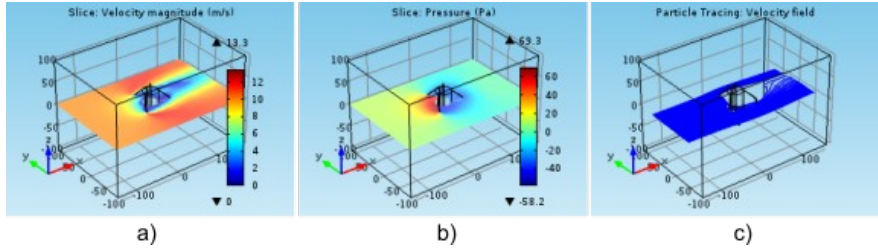


Fig. 4.51 – Posibilități de analiză calitativă a modelelor de turbine în mediul virtual: a) câmpul vitezelor; b) câmpul presiunilor; c) traiectoriile particulelor

Dacă ne referim la câmpul vitezelor (Fig. 4.52), urmărim mărimile vitezelor în fața (pe partea expusă vântului) și în spatele aripilor. Cu cât diferența dintre viteza de pe partea anterioară a aripii și cea posterioară este mai mare, cu atât vântul cedează o cantitate mai mare de energie, deci turbina este mai eficientă. De exemplu, dacă vom lua turbina cu aripi drepte din Fig. 4.52a, la un unghi de rotație $\beta=30^\circ$, putem observa că aripile A_1 și A_2 sunt dispuse simetric și câmpurile vitezelor au același aspect în vecinătatea lor. Cum aripa A_3 este paralelă cu direcția curentului de aer, putem concluziona că nu există acel dezechilibru necesar punerii în mișcare a turbinei. În schimb, pentru același unghi β , în cazul turbinei cu aripi curbe, situația este diferită (Fig. 4.52c). Aripa A_1 preia cu ajutorul concavității curentul de aer, în timp ce la nivelul aripilor A_2 și A_3 , datorită formelor lor, curentul de aer alunecă pe lângă acestea. Rezultă o tendință de rotație în sens antiorar a turbinei. Mai mult, aripa A_3 blochează curentul de aer pentru A_2 , viteza acestuia la suprafața aripii fiind mult micșorată, deci transmiterea de energie fiind redusă. Un lucru asemănător se întâmplă și în cazul modelului cu aripi înclinate (Fig. 4.52e). În Fig. 4.52 sunt doar câteva exemple, dar analiza poate continua cu alte unghiuri de rotație β și cu alte plane pe care să fie ilustrat câmpul vitezelor. În acest fel, putem să ne dăm seama care va fi evoluția dispozitivelor aflate în studiu din punct de vedere calitativ.

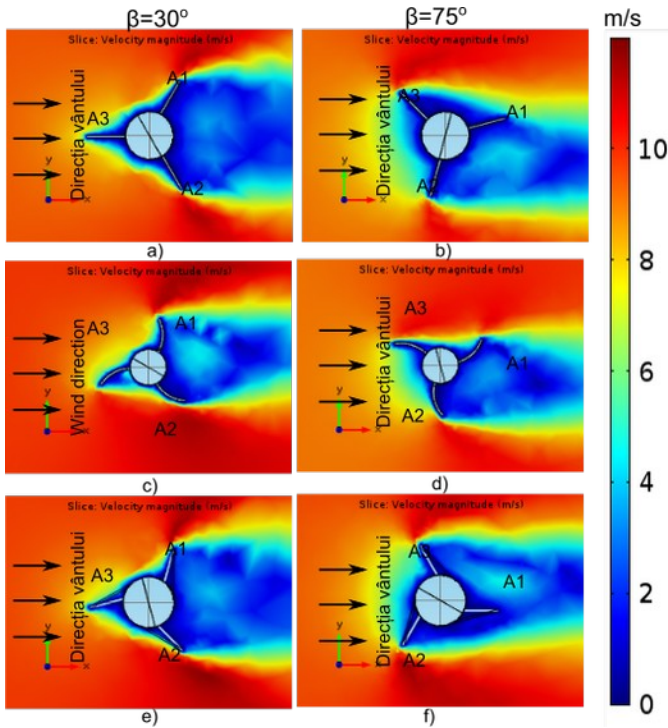


Fig. 4.52 – Câmpurile vitezelor în planele centrelor de greutate ale aripilor pentru diferite valori ale unghiului β (vedere de sus):
 a), b) modelul cu aripi drepte; c), d) modelul cu aripi curbe;
 e), f) modelul cu aripi înclinate (preluat și adaptat [70]).

Un alt rezultat care poate fi analizat din punct de vedere calitativ este reprezentarea câmpului presiunilor (Fig. 4.53). Pe baza diferențelor de presiune dinamică la nivelul feței anterioare, respectiv, posterioare, se poate aprecia forța exercitată de vânt asupra unei aripi și, deci, momentul produs de această forță.

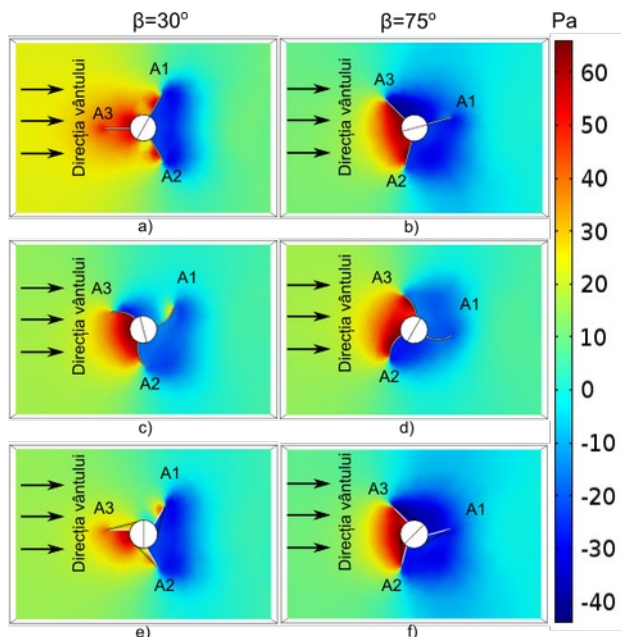


Fig. 4.53 – Câmpurile presiunilor în planele centrelor de greutate ale aripilor pentru diferite valori ale unghiului β (vedere de sus): a), b) modelul cu aripi drepte; c), d) modelul cu aripi curbe; e), f) modelul cu aripi înclinate (preluat și adaptat [70]).

Astfel, dacă luăm Fig. 4.53a), vom observa că situația presiunilor prezintă o simetrie perfectă, ceea ce ne duce la concluzia că modelul de turbină cu aripi drepte nu este eficient. Mergând mai departe, în Fig. 4.53b), observăm că, după ce ne-am așteptat la o rotație în sens orar, distribuția presiunilor în jurul aripilor turbinei arată o tendință de rotație în sens trigonometric, lucru indicat de diferențele mai mari de presiune pe fețele aripilor A_2 , dar și o oarecare diferență la nivelul aripilor A_1 . Trecând la modelul cu aripi curbe (Fig. 4.53c) și d), tendința de rotație în sens orar este evidentă. De exemplu, în Fig. 4.53b), chiar dacă situația pe aripile A_2 și A_3 pare destul de echilibrată, se observă că spre vârful aripilor A_1 apare o zonă de presiune mai înaltă, ceea ce generează o forță și un moment semnificativ. Acest lucru duce la acel dezechilibru necesar rotirii turbinei. Un lucru asemănător poate fi observat și în cazul turbinei cu aripi înclinate (Fig. 4.53e). Pe de altă parte, în cazul acestui model avem o situație de echilibru așa cum putem vedea în Fig. 4.53f). Analiza poate continua și pentru alte unghiuri β

de rotație față de poziția inițială. Trebuie, totuși, subliniat, odată în plus, că acestea sunt estimări statice. Turbinele sunt obstacole aflate în poziție de repaus, spre deosebire de situația reală, când acestea se rotesc și, prin urmare, apar momente de inerție și viteze relative care influențează semnificativ comportarea turbinelor. Totuși, pentru o estimare preliminară, consider că imaginea oferită de aceste simulări este suficient de relevantă.

Pe lângă astfel de analize calitative, putem face și analize cantitative prin determinarea momentelor forțelor exercitate de vânt asupra aripilor turbinelor. Pentru asta va trebui să luăm în considerare atât forța de tracțiune (F_D) cât și portanța (F_L). Componentele lor perpendiculare pe aripă, însumate și aplicate în centrul de greutate aripii vor da momentul forței exprimat în formula (IV.56), mărime care depinde de unghiul de atac α :

$$T = F_D R \sin \alpha + F_L R \cos \alpha \tag{IV.56}$$

În Fig. 4.54 este prezentată diagrama forțelor pe care vântul le exercită asupra aripiei.

Formula (IV.56) se traduce în programul COMSOL ca:

$$F_{tot} = -spf \cdot T_{stressx} * \sin \alpha - spf \cdot T_{stressy} * \cos \alpha, \text{ unde } \alpha \text{ este unghiul de atac.}$$

Pe parcursul derulării simulării, unghiul α se modifică pe măsură ce obiectul este rotit cu unghiul β față de poziția inițială (Fig. 4.54). Rezultatul acesta se înmulțește cu $R=30mm$ (distanța dintre centrul de greutate al aripiei și axa de rotație a turbinei) și obținem momentul forței.

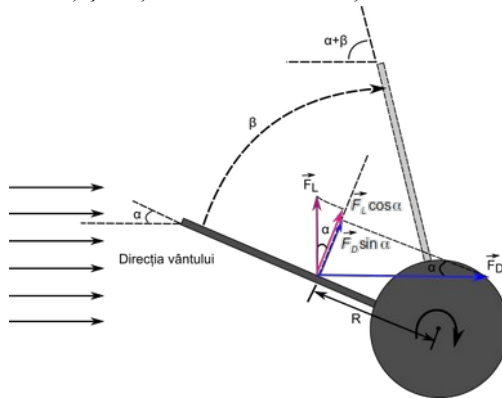


Fig. 4.54 – Diagrama forțelor care acționează asupra aripiei
 (preluat și adaptat [70])

În Fig. 4.55 – 4.58, am reprezentat valorile momentelor acestor forțe la o rotație a obiectului cu β de la 0° la 360° din 15° în 15° , la o viteză a vântului de 10m/s . Valorile pozitive ale momentului forței dau o rotație a turbinei în sens trigonometric, iar cele negative o rotație în sens orar. Un astfel de studiu este complementar observațiilor calitative de mai devreme. Astfel, în Fig. 4.55, avem situația la nivelul turbinei cu aripi curbe. Sunt reprezentate valorile momentului forței funcție de unghiul β pentru următoarele cazuri: cele trei aripi luate separat, respectiv, momentul total.

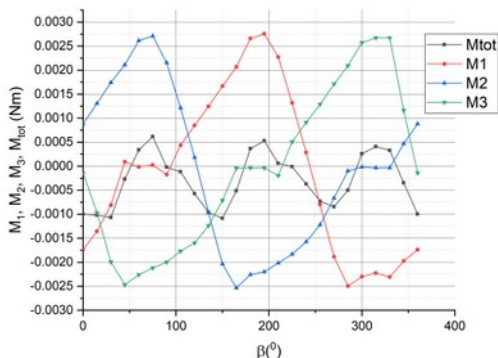


Fig. 4.55 – Reprezentarea momentelor forțelor la nivelul aripilor turbinei cu aripi curbe [70]

Analizând acest grafic putem face următoarele observații:

1. Cele trei aripi au comportări perfect similare cu variații armonice ale valorilor momentelor forțelor. Acest rezultat este unul pe care îl așteptăm întrucât aripile sunt identice, iar comportarea lor sub influența curentului de aer trebuie să fie identică. De asemenea, aspectul armonic al curbelor se datorează faptului că fiecare dintre ele este rotită cu câte 360° față de poziția inițială. Valorile momentelor forțelor exercitate asupra aripilor se înscriu în intervalul $[-0.0025, 0.0025]$ Nm.

2. Suma momentelor la nivelul celor trei aripi, ilustrată prin curba neagră, se situează în cea mai mare parte a intervalului sub nivelul 0. Dacă vom calcula valoarea medie, vom obține $\bar{M}=75 \cdot 10^{-4}$ Nm, care este mai mare decât $\bar{M}=2,4 \cdot 10^{-4}$ Nm, valoarea obținută prin calcul teoretic. Rezultă că turbina cu aripi curbe trebuie să se rotească sub acțiunea vântului. Pentru modelul de turbină

cu aripi drepte, reprezentarea grafică a momentelor forțelor se găsește în Fig. 4.56.

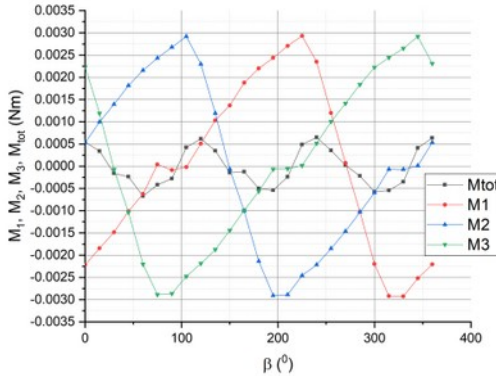


Fig. 4.56 – Reprezentarea momentelor forțelor la nivelul aripilor turbinei cu aripi drepte

Și în cazul modelului cu aripi drepte, se observă similitudinea perfectă între reprezentările momentelor forțelor pentru fiecare aripă în parte. În plus, suma acestora ne dă o curbă sinusoidală cu simetrie față de axa orizontală. De aici, rezultă un moment mediu pe o rotație completă egal cu zero. Așadar, acest model nu ar trebui să se rotească ci, conform rezultatelor, ar trebui să aibă o mișcare oscilatorie.

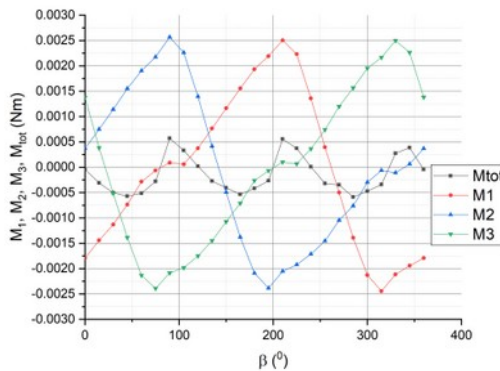


Fig. 4.57 – Reprezentarea momentelor forțelor la nivelul aripilor turbinei cu aripi înclinate

Aceeași reprezentare, dar pentru turbina cu aripi înclinate, poate fi observată în Fig. 4.57. Și în această situație comportarea momentului forțelor de la nivelul aripilor este, după cum ne așteptam, similară. În cazul momentului total, putem observa că predomină valorile negative. Valoarea medie fiind $\bar{M}=37 \cdot 10^{-4} Nm$, valoare care ar trebui să fie suficientă pentru rotirea turbinei.

Pentru a avea o imagine de ansamblu, în Fig. 4.58, avem alăturate curbele momentelor forțelor funcție de unghiul β pentru cele trei modele de turbine.

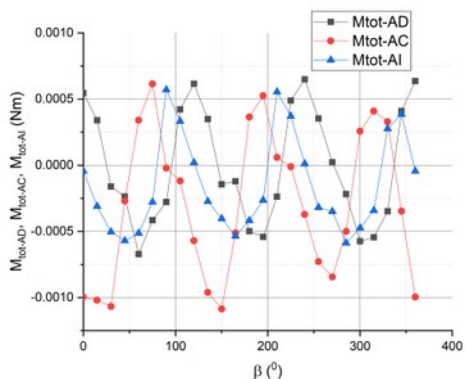


Fig. 4.58 – Momentele totale funcție de unghiul β pentru cele trei modele de turbine [70]

Este evidentă eficacitatea mai mare a turbinei cu aripi curbe, urmată de cea cu aripi înclinate. Turbina cu aripi drepte ar trebui să nu funcționeze conform acestui studiu. Pentru toate modelele momentul forței are o variație armonică, datorată distribuției geometrice a aripilor. Valorile maxime sunt atinse de turbina cu aripi curbe (aproximativ -0,001 Nm) pentru unghiuri de rotație 30°, 150° și 280°. Pentru același model valorile pozitive ale momentului sunt atinse la 75°, 195° și 315° și sunt cu aproximativ 45% mai mici decât maximele negative. Maximele momentelor forțelor pentru celelalte două modele sunt mai mici (aproximativ 0.0006 Nm) și sunt atinse la unghiuri diferite de cele din cazul turbinei cu aripi curbe, lucru firesc datorită geometriilor diferite ale fiecărui model în parte. De exemplu, la un unghi $\beta=30^\circ$, momentul forței pentru modelul cu aripi curbe are valoarea maximă, în timp ce pentru celelalte modele valorile sunt mai mici. Pentru $\beta=75^\circ$, momentul forțelor pentru modelul cu aripi curbe este pozitiv (deci induce o rotație în sens trigonometric), în timp ce, pentru celelalte

modele, valorile momentelor sunt negative, ceea ce înseamnă o rotație în sens orar.

Prin urmare, după cum era de așteptat, simularea comportării celor trei modele de turbine sub influența vântului arată că modelul de turbină cu aripi drepte are cele mai slabe performanțe, urmat de cel cu aripi înclinate și cel mai eficient ar fi modelul cu aripi curbate. Rămâne ca aceste rezultate să fie verificate în condiții de laborator cu ajutorul unor modele obținute la imprimanta 3D [71].

IV.2.4. Concluzii privind utilizarea tunelului aerodinamic virtual în studiul dinamicii fluidelor

În subcapitolele anterioare, am prezentat modul în care pot fi studiate fenomene care țin de mecanica fluidelor într-un tunel aerodinamic virtual realizat cu ajutorul programului COMSOL Multiphysics [69, 70]. Prin aceste metode poate fi calculat coeficientul aerodinamic al tracțiunii (c_D) și pot fi studiate diferite modele de turbine și comportamentul lor sub influența curenților de aer. Am arătat că fenomenele care se desfășoară atunci când în calea vântului interpunem un obstacol pot fi studiate atât din punct de vedere calitativ cât și cantitativ. Programul COMSOL Multiphysics calculează automat vitezele și presiunile din interiorul incintei tunelului aerodinamic și afișează aceste mărimi sub diferite forme grafice. Astfel, imaginile create cu ajutorul programului oferă posibilitatea unor analize calitative care să ducă la o înțelegere de către elevi a mecanismelor de derulare a fenomenelor fizice implicate. Elevii nu trebuie să dețină cunoștințe foarte avansate de Fizică pentru a vizualiza și explica modul în care se comportă diferite obiecte aflate în bătaia vântului. Având această înțelegere calitativă, lor le va fi mai ușor să treacă la partea de aplicare a ecuațiilor caracteristice. Pe lângă aceste aprecieri calitative, pot fi realizate și determinări cantitative. Puține laboratoare școlare sunt dotate cu tunele aerodinamice și cu posibilitatea desfășurării unor experimente legate de dinamica fluidelor, deci o abordare în spațiul virtual rezolvă acest neajuns. Prin parcurgerea activităților descrise mai devreme, elevii vor dobândi pe lângă noțiunile legate de mecanica fluidelor și abilități de operare a unor programe de computer mai sofisticate, precum COMSOL Multiphysics sau FreeCAD. Pentru tinerii care se pregătesc de o carieră din domeniul STEM stăpânirea unor astfel de programe este foarte importantă, iar activitățile propuse ajută la familiarizarea cu ele. Rigoare în gândire, anticiparea unor variabile, analiza unor rezultate, sunt lucruri

pe care le urmărim prin implementarea acestor activități și prin operarea cu programele respective.

IV.3. Activități practice pentru studiul dinamicii fluidelor

Odată parcurse etapele studiului fenomenelor din dinamica fluidelor în spațiul virtual, următoarea etapă logică este aplicarea celor studiate și în condiții reale, de laborator. Cu ajutorul unor tunele aerodinamice și a unei imprimante 3D, putem verifica datele obținute în mediul virtual.

IV.3.1. Studiul experimental al caracteristicilor aerodinamice ale unor forme geometrice [69]

În secțiunea IV.2.2., am arătat cum putem determina coeficientul aerodinamic de tracțiune folosind un tunel aerodinamic virtual. Continuarea logică este verificarea determinărilor și în condiții reale, de laborator. Pentru studiul experimental a coeficientului de rezistență c_D am folosit dispozitivul din dotarea laboratorului de Mecanică al Facultății de Fizică, Universitatea din București (Fig. 4.59).

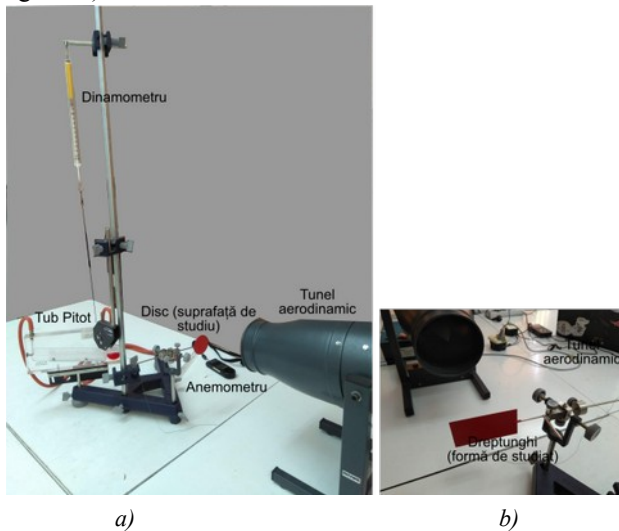


Fig. 4.59 – Dispozitiv experimental: a) vedere de ansamblu;
b) detaliu (preluat și adaptat [69])

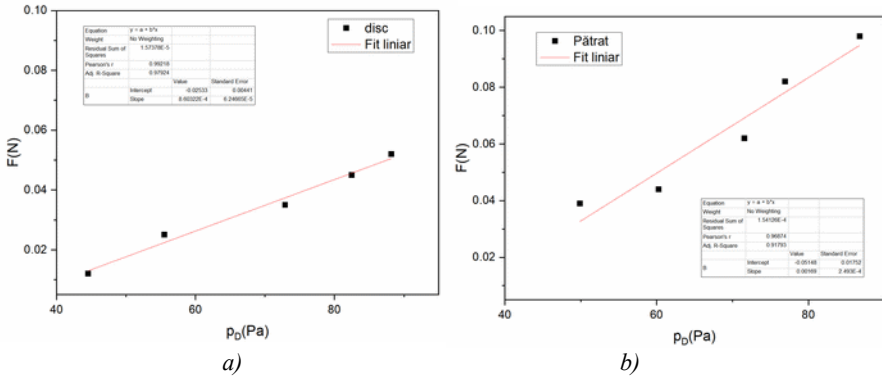


Fig. 4.60 – Graficele forțelor de tracțiune funcție de presiunea dinamică:
 a) disc ($c_D=0.91$); b) pătrat ($c_D=1.34$) (preluat și adaptat [69])

După cum se poate observa, rezultatele sunt apropiate atât de cele obținute în tunelul aerodinamic virtual (pentru disc $c_D=0,92$, pentru pătrat $c_D=1,09$) cât și față de cele din literatura de specialitate în care, pentru o suprafață plană, $c_D=1,1$ [64].

IV.3.2. Studiul experimental al modelelor simple de turbine virtuale [71]

Odată familiarizați cu instrumentarul de laborator – funcționarea tunelului aerodinamic, anemometrul etc. - elevii sunt gata pentru etapa următoare: studiul experimental al modelelor simple de turbine studiate anterior cu ajutorul tunelului aerodinamic virtual și a programului COMSOL Multiphysics [70]. Prin construirea modelelor studiate în spațiul virtual, o parte din activitatea de proiectare a fost făcută. Programul FreeCAD folosit la construirea modelelor are avantajul de a exporta fișierele în formate compatibile cu imprimantele 3D cele mai des întâlnite - *.stl* sau *.step*.

Pentru realizarea prototipurilor de turbine am folosit aceleași modele ca în cazul studiului virtual [70]: pe un tambur cilindric trei aripi decalate la unghiuri de 120° una față de cealaltă – un model cu aripi drepte, unul cu aripi curbate și unul cu aripi înclinate față de direcția generatoarelor cilindricului. Odată construite modelele de bază, pentru a putea face utilizabile turbinele odată tipărite la imprimanta 3D, au fost necesare unele modificări. În primul rând, au fost făcute niște scobituri cilindrice pentru aplicarea unor rulmenți care să ușureze mișcarea de rotație. Apoi, un canal cilindric care să străbată întreaga lungime a tamburului

cilindric, prin care să treacă nestingherit axul pe care se montează turbina. În fine, un canal inelar care să permită montarea și demontarea capacelor conice care asigură profilul aerodinamic al corpului turbinei.

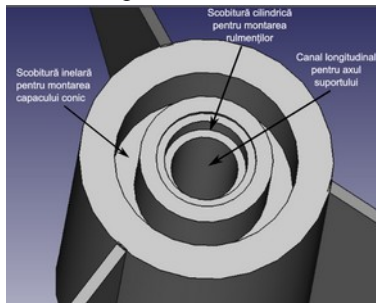


Fig. 4.61 – Scobiturile practicate în tamburul cilindric pentru montarea turbinelor pe suport și a componentelor acestora.

Toate aceste lucruri sunt prezentate în Fig. 4.61. În Fig. 4.62., este ilustrat capacul conic. El prezintă o bază inelară care se încastrează în scobitura inelară a cilindrului și un orificiu în vârf care permite montarea axului suportului turbinei. Aceleași modificări au fost aduse și celorlalte modele de turbine, cel cu aripi curbate și cel cu aripi înclinate.

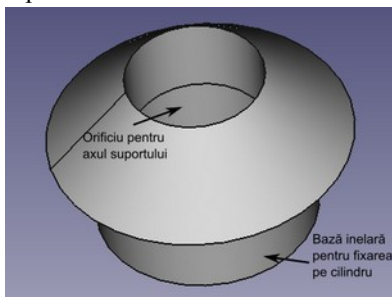


Fig. 4.62 – Capacul conic al turbinelor și sistemul de fixare

Aceste modele, odată finalizate, au fost trimise la imprimanta 3D. Pentru realizarea acestor prototipuri am folosit o imprimantă UP!Plus produsă de Delta Micro Factory Corporation aflată în dotarea laboratorului SERA din cadrul Facultății de Fizică, Universitatea din București. Ca material de lucru am folosit un filament PLA (Polylactic Acid). Modelele au trebuit să fie proiectate astfel încât să se potrivească cu dimensiunile maxime de tipărire, în cazul de față un cub

cu dimensiunile 14 cm x 14 cm x 14 cm (Fig. 4.64). Pentru ca turbinele să se rotească, ele au fost montate pe un suport dotat cu rulmenți. (Fig. 4.65).

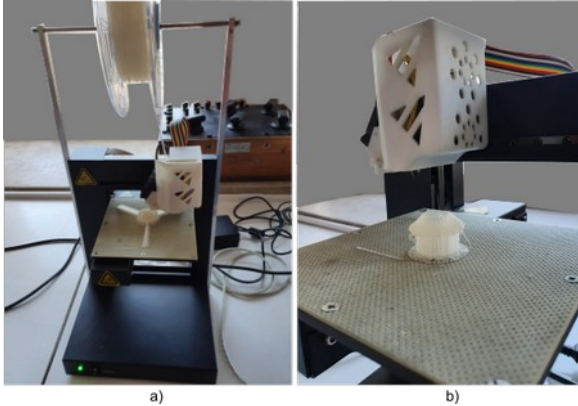


Fig. 4.64 – Imprimarea modelelor de turbine:
 a) privire de ansamblu; b) detaliu [71]

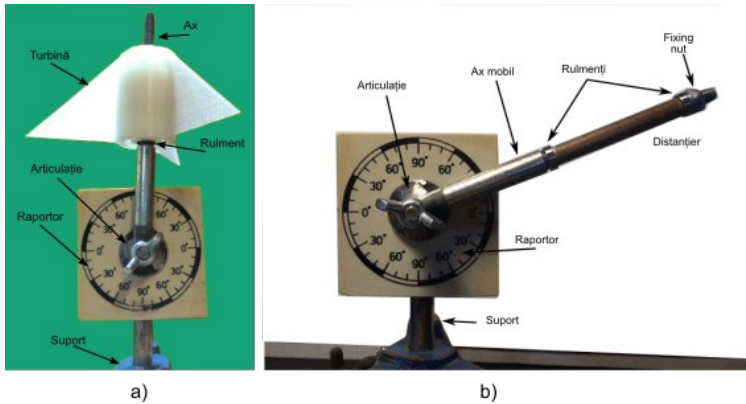


Fig. 4.65 – Suportul dispozitivului experimental: a) detaliu cu turbina montată pe suport; b) părțile componente ale suportului (preluat și adaptat [71])

Acesta constă dintr-o bază de greutate mare, pentru a asigura stabilitatea sistemului și un ax pe care sunt montați rulmenții. Axul poate să se rotească în jurul unei articulații, putând astfel fi modificat unghiul de incidență a curentului de aer. Pentru a măsura acest unghi, pe suport este montat un raportor. Axul suportului intră prin orificiul cilindric practicat prin corpul turbinei. Aceasta se

așează pe primul rulment, după care se introduce pe ax cel de-al doilea rulment, cel superior și tot ansamblul este fixat cu ajutorul unei piulițe (Fig. 4.65).

În Fig. 4.66, este prezentat întregul ansamblu al dispozitivului experimental. Pe lângă turbina montată pe suport și tunelul aerodinamic, acest ansamblu mai cuprinde un anemometru pentru măsurarea vitezei vântului, un turometru stroboscopic pentru măsurarea frecvenței de rotație a turbinelor.

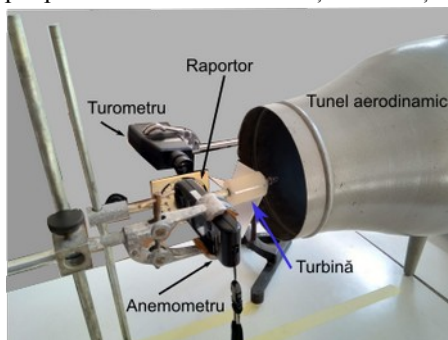


Fig. 4.66 – *Ansamblul experimental*

Fiecare model de turbina a fost montat pe suport, plasat în fața tunelului aerodinamic, iar unghiul dintre axul turbinei și direcția vântului a fost variat între -60° și 90° cu unghiurile negative în sens trigonometric, iar cele pozitive pentru o înclinare în sens orar raportat la direcția verticală. Am înregistrat valorile vântului în fața și în spatele turbinelor pentru a determina care dintre ele preia mai multă energie cinetică din partea vântului, turația pe care o capătă turbinele și timpul necesar pornirii turbinei. Unghiul de înclinare față de verticală a fost variat din 15° în 15° între 0° și 60° în sens orar și între 0° și 30° în sens trigonometric (cu spatele la vânt). Pentru fiecare dintre aceste poziții am variat viteza vântului între 8 m/s și 12 m/s , cu un pas de 1 m/s .

Rezultatele experimentale arată că pentru toate tipurile de turbine viteza de rotație crește odată cu creșterea vitezei vântului, atunci când turbinele au fost plasate vertical în fața vântului; un rezultat așteptat, de altfel. Un alt rezultat previzibil, și anticipat de simulările din spațiul virtual, a fost acela că turbina cu aripi curbe a înregistrat cele mai mari valori ale vitezei de rotație, iar cea cu aripi înclinate cele mai mici (Fig. 4.67). Surprinzător, chiar dacă teoretic nu ar fi trebuit să se rotească, turbina cu aripi drepte a înregistrat și ea mișcări destul de bune.

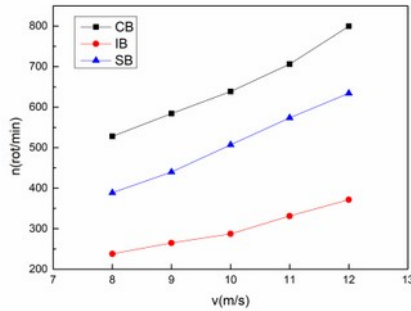


Fig. 4.67 – Turația turbinelor funcție de viteza vântului atunci când turbinele sunt în poziție verticală ($\alpha=0^\circ$);
 CB – aripi curbe, IB – aripi înclinate, SB – aripi drepte [71]

Exceptând comportarea surprinzător de bună a modelului cu aripi drepte față de cel cu aripi înclinate, rezultatele sunt în concordanță cu cele obținute în studiul virtual. În Fig. 4.68., este prezentată turația funcție de unghiul de înclinare pentru două viteze diferite ale vântului.

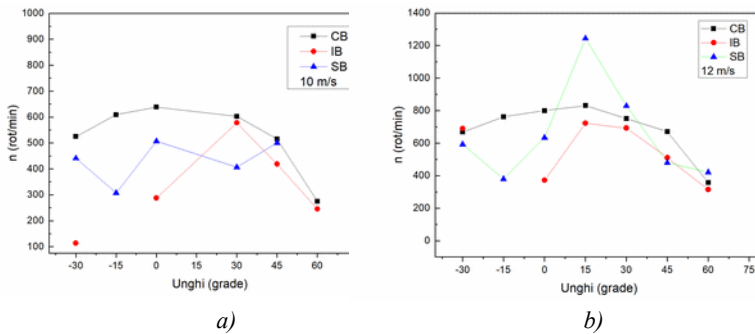


Fig. 4.68 – Turația funcție de unghiul de înclinare al axului turbinei: CB- aripi curbate, IB – aripi înclinate, SB – aripi drepte. a) pentru o viteză a vântului de 10 m/s; b) pentru o viteză a vântului de 12 m/s. [71]

Atunci când viteza vântului este de 10 m/s modelele cu aripi curbate și drepte ating vitezele maxime de rotație în poziție verticală ($\alpha=0^\circ$), în timp ce modelul cu aripi înclinate la un unghi $\alpha=45^\circ$ în sens orar (Fig. 4.68a). Atunci când viteza vântului este de 12 m/s (Fig. 4.68b), toate cele trei modele ating viteza de rotație maximă la un unghi de 15° și modelul cu aripi drepte are eficiență maximă.

Se observă, totuși, că la un unghi de înclinare al axului de 30° , turbina cu aripi înclinate se apropie ca performanțe de cea cu aripi curbe, ceea ce ne face să credem că o astfel de utilizare a acestui model ar fi mai potrivită.

O altă dependență pe care am urmărit-o, a fost legată de timpul necesar punerii în mișcare a turbinelor la diverse unghiuri de înclinare a axului de rotație (Fig. 4.69a) și la diferite viteze (Fig. 4.69b).

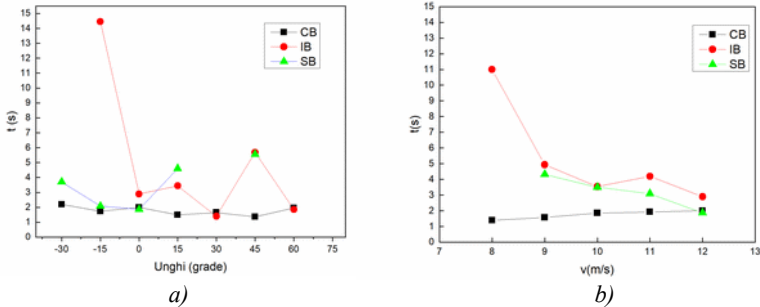


Fig. 4.69 – Timpul necesar punerii în mișcare a turbinelor:

a) funcție de unghiul de înclinare al axei; b) funcție de viteza vântului [71]

Un alt aspect urmărit în cadrul acestui studiu experimental a fost diferența dintre vitezele vântului din fața și din spatele turbinei corelată cu turația căpătată de turbină (Fig. 4.70). Pentru turbina cu aripi curbate cele mai mari valori ale turației sunt corelate cu diferențe mici între vitezele vântului pentru majoritatea pozițiilor. În cazul modelului cu aripi înclinate diferențele dintre vitezele vântului sunt în directă legătură cu turațiile căpătate de turbină în majoritatea situațiilor. Studiul experimental a arătat o serie de similitudini, dar și de diferențe față de situația din tunelul aerodinamic virtual. Printre asemănări, cea mai evidentă este aceea că modelul de turbină cu aripi curbate este cel mai eficient în toate situațiile. Deși studiul virtual punea modelul cu aripi înclinate pe cel de-al doilea loc într-un top al eficienței, în cadrul studiului de laborator acesta a avut comportarea cea mai slabă. Excepție face cazul în care turbina se află la orizontală, caz în care eficiența se apropie chiar de cea a modelului cu aripi curbe. În același timp, modelul cu aripi drepte, care, conform studiului virtual ar fi trebuit să efectueze doar o mișcare oscilatorie în jurul poziției de echilibru, s-a mișcat destul de bine în anumite condiții. Toate aceste diferențe arată limitările studiului în mediul virtual, faptul că există factori care nu au fost luați în

considerare, factori care în realitate influențează semnificativ comportarea sistemului în realitate.

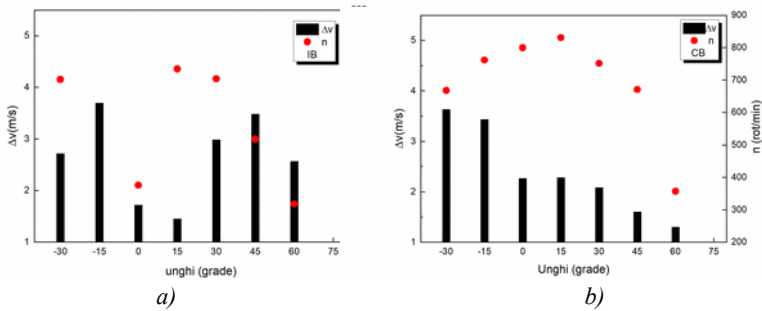


Fig. 4.70– Variația vitezei vântului din poziția anterioară, respectiv, posterioară turbinei (Δv), conectată cu turația turbinei și cu unghiul de înclinare al axului de rotație: a) CB – turbina cu aripi curbate; b) IB – turbina cu aripi înclinate [71]

De asemenea, diferențele dintre cele două studii pot fi puse și pe seama imperfecțiunilor dispozitivului experimental; pentru acesta am folosit instrumente didactice, deoarece nu am avut la dispoziție instrumentar specific cercetării specifice unui laborator aerodinamic.

IV.4 Concluzii la capitolul IV

Intenția declarată a realizării acestei suite de experimente, virtuale și reale, a fost din capul locului demonstrarea utilității acestei abordări în context educațional. În acest sens, consider că activitățile descrise în acest capitol se înscriu cu succes printre activitățile care pot aduce plus valoare studiului Fizicii și al științelor. În primul rând, abordarea graduală, pornind de la elemente teoretice, observații din natură, trecând apoi la modelarea pe calculator și încheind cu punerea în practică a experimentelor virtuale îi determină pe elevi să gândească, creezează noi competențe și îi ajută să înțeleagă fenomenele fizice studiate. Chiar dacă abordarea ideală este aceea în care se pot face atât experimentele virtuale cât și cele de laborator, în absența unui instrumentar de laborator adecvat am demonstrat că laboratoarele virtuale pot constitui o alternativă viabilă celor reale. Bineînțeles, trebuie să avem în vedere să facem întotdeauna distincția necesară dintre real și virtual și să explicăm în permanență elevilor acest lucru. Este foarte important să păstrăm permanent un echilibru între limitările unui experiment ideal și avantajele acestuia.

CAPITOLUL V

Factori care influențează atitudinea profesorilor privind adoptarea metodelor de predare STEM

V.1. Metodele de predare STEM și modul în care se raportează profesorii la acestea [12]

Așa cum am precizat încă din Capitolul I, cercetătorii din domeniul științelor educației recunosc la unison importanța conceptului STEM (știință, tehnologie, inginerii și matematică) [81], însă nu există o definiție clară a acestuia. Multe dintre definiții vorbesc despre o abordare interdisciplinară bazată pe exemple desprinse din viața de zi cu zi [82], iar din alte puncte de vedere, educația integrată STEM ar fi o modalitate de a oferi elevilor noțiuni și competențe din domeniul tehnologic [83]. Indiferent de perspectiva abordată, educația STEM urmărește, pe lângă atingerea de către elevi a unor cunoștințe, abilități și competențe din domeniul științelor, tehnologiei, ingineriilor și matematicii, și stimularea participării directe la actul educațional [84], colaborarea cu colegii și cu profesorul [85], stimularea interesului și a motivației elevilor pentru învățare [84]. Datorită faptului că această abordare facilitează contactul elevilor cu realitatea, cu situațiile din viața de zi cu zi, acestora li se va dezvolta capacitatea de a rezolva probleme practice cu care se vor întâlni de-a lungul întregii vieți [86].

Este clar că atitudinea profesorului față de actul predării și față de abordarea respectivă are o influență crucială asupra modului în care elevii vor privi noțiunile studiate și chiar modul în care vor aborda mai târziu rezolvarea unor probleme din viața de zi cu zi.

A fost evaluată frecvent interacțiunea dintre atitudini, abilități și cunoștințe – așa numitul model *will, skill, tool (WST)* sau, altfel spus, modelul de voință, îndemânare, instrument [87]. De asemenea, absența unei atitudini negative este deosebit de importantă [88], având în vedere că aceste atitudini se vor reflecta în procesul de predare – învățare și, mai departe, se vor transmite elevilor.

Atitudinea a fost cercetată în relație cu numeroși factori precum competența, percepția eficienței, ușurința în utilizarea tehnologiei sau experiența

profesorului [87]. Plăcerea/satisfacția (*perceived enjoyment*) [89] și percepția utilității (*perceived usefulness*) [90] sunt, de asemenea, factori care influențează atitudinile profesorilor față de anumite metode de predare.

Chiar dacă în momentul de față un număr mare de profesori susțin predarea integrată, bazată pe strategii didactice investigative și interdisciplinare, îmbunătățirea competențelor elevilor folosind tehnologia ca punte de legătură între multiple discipline diferite a rămas o provocare semnificativă [91]. În cadrul abordării integrate a subiectelor STEM (INT), conținuturile învățării nu sunt tratate separat, ci ca un ansamblu dinamic.

Chiar dacă, datorită situației impuse de pandemia de COVID-19 care a dus la derularea educației la distanță pe o scară foarte largă și la adoptarea accelerată a unor instrumente digitale online, lucru care a dus la acceptarea, pe moment, a acestor tehnologii, odată cu revenirea la normal, mulți dintre aceștia au renunțat la instrumentele digitale sau au păstrat un număr redus [93]. De asemenea, încă este manifestată o oarecare reticență privind adoptarea pe scară largă a strategiilor educaționale care promovează abordările interdisciplinare sau învățarea explorativă.

Toate aceste motive au condus la un studiu mai aprofundat, rezultatele esențiale fiind publicate în articolul: *Secondary teachers' competencies and attitude: A mediated multigroup model based on usefulness and enjoyment to examine the differences between key dimensions of STEM teaching practice* [12], autori F.S. Chiriacescu, B. Chiriacescu et al., pornind de la modelul *WST* [87]. Pe lângă abilități (*skill*) și motivație (*will*), am adăugat două noi dimensiuni, percepția utilității (*perceived usefulness*) și satisfacția /plăcerea (*enjoyment*) raportat la strategiile didactice specifice STEM. Am urmărit explorarea efectului de mediere al percepției utilității și plăcerii în raport cu competențele și atitudinile profesorilor din învățământul preuniversitar, cu accentul pus pe abordarea integrată a STEM (INT) și strategia didactică *IBL* (*Investigation Based Learning*). Toate acestea au fost puse în contextul specializărilor profesorilor. Conform unor studii [84], există aspecte diferite, dar interconectate ale abordării INT. Pe lângă INT, au fost studiate și aspecte legate de învățarea bazată pe investigație (*IBL*), deoarece nu a fost acordată suficientă atenție asemănărilor și deosebirilor dintre cele două abordări, de unde și necesitatea înțelegerii modului în care competența profesorilor influențează acceptarea curriculumului STEM, precum și dacă dimensiunile cheie ale predării STEM duc la diferențe.

Abordarea integrată (INT) a disciplinelor STEM poate fi eficientă doar dacă profesorii care predau subiecte în regim INT manifestă o atitudine pozitivă privind STEM. Mai departe, o astfel de atitudine duce la creșterea numărului de elevi interesați de a urma o carieră legată de științele naturii și de tehnologii [94, 95]. Plecând de aici, este clar că îmbunătățirea atitudinii profesorilor legat de abordarea INT poate duce, cu mari beneficii pe termen scurt, mediu și lung, la implementarea acestui tip de curriculum la clasă. Dacă vorbim despre o abordare integrată a disciplinelor STEM (INT), Fizica este elementul liant, care poate aduce laolaltă domenii diferite, pentru că Fizica este singurul domeniu din cadrul STEM care are impact asupra fiecăreia dintre aceste discipline. Este motivul pentru care m-am ocupat de această abordare INT, ca fiind cea mai apropiată de predarea Fizicii în mediul preuniversitar.

Astfel, întrebările după care a fost condusă cercetarea au fost [12]:

1. Atitudinea profesorilor care au adoptat IBL și INT ca metode de predare este afectată de competențele acestora și este controlată de specializare?
2. Percepția utilității și plăcerea mediază relațiile dintre competențele și atitudinea profesorilor care au abordat IBL și INT ca metode de predare și modul în care acestea sunt controlate de specializare?
3. Intensitatea relațiilor dintre competențe și atitudini mediate de plăcere diferă între IBL și INT?
4. Intensitatea relațiilor dintre competențe și atitudini mediate de percepția utilității diferă între cele două metode de predare STEM?

V.2. Variabilele luate în calcul în studiul [12]

V.2.1. Competențele (COM) ca variabilă externă

Profilul unui profesor eficient poate fi privit astfel:

- manifestă încredere în sine și abordează sarcinile cu eficiență, îmbrățișând provocările [96];
- utilizează strategii integratoare și transdisciplinare [97], astfel de strategii stimulând implicarea cognitivă și influențând implicarea și perseverența în cadrul activităților școlare.

Prin urmare, este justificat să presupunem că atitudinile sunt influențate de competențele de a aborda metodele de predare STEM.

În aceste condiții, necesitatea evaluării competențelor profesorilor de a identifica subiecte potrivite predării cu mijloacele STEM a venit în mod firesc. Am măsurat opiniile profesorilor privind rolul metodelor de predare STEM raportate la înțelegerea de către elevi a conținuturilor predate. De asemenea, a fost evaluată măsura în care profesorii pot identifica strategii potrivite pentru a integra tehnologia în cadrul procesului instructiv educativ și pentru a stimula elevilor gândirea critică.

V.2.2. Variabilele de mediere

a) Percepția utilității (Perceived usefulness - USE)

Percepția utilității (*Perceived utility - PU*) poate fi definită ca măsura în care o persoană crede că utilizarea unui sistem, instrument, dispozitiv, poate îmbunătăți performanțele obținute într-un anumit domeniu [98]. O altă abordare arată că PU este percepția unei persoane privind măsura în care utilizarea unei tehnici specifice poate crește performanța personală în rezolvarea unei sarcini de lucru [99]. Astfel, o serie de elemente duc la percepția unor strategii didactice ca fiind utile:

- atunci când sunt încurajate interacțiunile dintre toți actorii implicați în procesul instructiv-educativ, respectiv, interacțiunea elev-elev, elev-profesor, profesor-profesor și chiar, în unele situații, cu implicarea și a altor actori, precum părinții;

- atunci când sunt aduse în prim-plan situații desprinse din viața de zi cu zi, situații cu care elevii se vor întâlni pe tot parcursul vieții sau carierei [100, 101];

- atunci când este stimulată intenția de a utiliza instrumente digitale în procesul didactic [102]. Utilitatea, fiind un factor mediator dintre ușurința de a utiliza aceste instrumente și atitudine, prin creșterea valorii produsului final, este influențată adoptarea noilor tehnologii în procesul instructiv-educativ [103];

Dacă vorbim despre adoptarea instrumentelor specifice educației STEM, cum sunt IBL și INT, subiectele studiului, competențele profesorilor acumulate în acest domeniu pot duce la o atitudine pozitivă a acestora față de instrumentele menționate, lucru care poate fi determinat prin PU. Factorul PU ne va arăta măsura în care profesorii au încercat să implementeze cele două strategii didactice, în ciuda eforturilor mai mari necesare implementării lor la clasă. Pe

lângă asta, au fost evaluate opiniile apărute ca urmare a adoptării fiecărei abordări ca metodă necesară și utilă aplicată de profesorii din învățământul secundar.

b) Satisfacția /Interesul/ Plăcerea (Perceived Enjoyment - ENJ)

Plăcerea este înțeleasă, în cazul de față, ca gradul în care o activitate care implică folosirea tehnologiei în procesul instructiv-educativ este percepută ca fiind agreabilă prin ea însăși, fără a lua în considerare rezultatele pe care le anticipăm [104]. Ca stare afectivă, plăcerea este o parte foarte importantă a motivației de a întreprinde o anumită acțiune. În contextul nostru, plăcerea este un exemplu de motivație intrinsecă afectând ușurința cu care sunt adoptate strategiile educaționale moderne.

În cadrul studiului realizat, plăcerea măsoară dacă profesorii sunt mulțumiți de utilizarea metodelor de predare specifice STEM, dacă ei consideră activitățile respective ca fiind plicticoase sau, dimpotrivă, amuzante, incitante, dacă sunt atrași de acest tip de activități, dacă le consideră interesante sau aducătoare de satisfacție.

V.2.3. Atitudinea (ATT) ca variabilă dependentă

În contextul prezentat, atunci când vorbim despre atitudine ne referim la acel factor critic care influențează interesul profesorilor privind adoptarea unui anumit stil de predare, respectiv, cele caracteristice abordărilor specifice STEM. În general, atitudinea poate fi definită ca o evaluare pozitivă sau negativă a unor păreri, intenții sau acțiuni. Tot în sens mai larg, atitudinea este acea tendință psihologică prin care este evaluată o anumită entitate ca fiind favorabilă sau nefavorabilă [106]. O altă definiție ce poate fi dată conceptului, dat fiind cadrul în care ne aflăm, este aceea conform căreia atitudinea este un concept mental care descrie emoții favorabile sau nefavorabile privind o anumită strategie didactică. Atitudinea pozitivă a profesorului față de un subiect anume, va induce și elevilor o atitudine pozitivă față de subiectul respectiv [105], în timp ce o atitudine negativă influențează în egală măsură percepția elevilor pe tema dată.

În ceea ce privește adoptarea metodelor de predare STEM, atitudinea profesorilor depinde de competențele lor cognitive. Pentru a pune în practică aplicarea strategiei propuse, pentru a proiecta și implementa cu ușurință etapele de parcurgere a subiectului predat, ei trebuie să cunoască foarte bine ce presupune strategia respectivă.

V.3. Detaliile studiului efectuat în rândul profesorilor din învățământul preuniversitar privind integrarea STEM în practicile didactice [12]

V.3.1. Ipotezele de lucru ale studiului

Dintre factorii care influențează atitudinea, am ales competențele, percepția utilității și plăcerea. Alegerea competențelor este justificată de faptul că, pentru a preda o anumită disciplină și pentru a aplica o anumită strategie didactică, profesorii au nevoie de un set de abilități și cunoștințe. Pe de altă parte, este recunoscut faptul că percepția utilității și plăcerea sunt factori afectivi care determină atitudinea. Pentru a investiga relațiile dintre factorii descriși mai sus, am folosit modelul de mediere multigrup (*mediation multigroup model*). Am urmărit demonstrarea existenței unor legături între cei patru factori ai modelului de cercetare (Fig. 5.1). Aceștia interacționează sub influența factorului moderator, respectiv, strategia didactică. Chiar dacă în vizorul studiului au intrat două astfel de strategii, metoda învățării prin investigație (IBL) și abordarea integrată STEM (INT), voi lua în discuție doar rezultatele care se referă la abordarea integrată, aceasta plind-se mai bine pe subiectul prezentei teze, adică abordări STEM utile predării Fizicii.

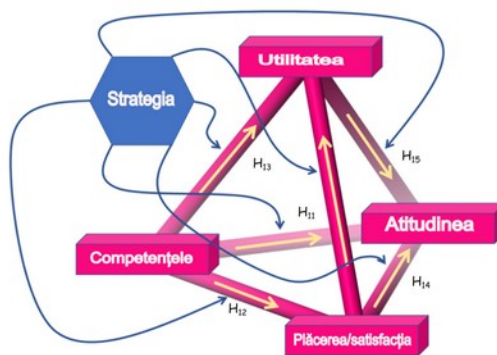


Fig. 5.1 - Diagrama modelului de mediere multigrup preluat și adaptat [12]

Așadar, pornind de la studiile anterioare realizate pe această temă, au fost stabilite următoarele ipoteze de lucru:

Ipoteza nr. 1 - Există o legătură directă și pozitivă între Competențe și Atitudini (H_{11}), Competențe și Plăcere/Satisfacție (H_{12}), Competențe și Utilitate (H_{13}), Plăcere și Atitudini (H_{14}) și între Utilitate și Atitudini (H_{15}) în cazul metodelor de predare specifice STEM (cu precădere m-am ocupat de INT).

Ipoteza nr. 2 – Utilitatea (H_{22}) și Plăcerea (H_{21}) mediază relațiile dintre Competențe și Atitudine în metodele de predare specifice STEM

Ipoteza nr. 3 - Relațiile dintre Competențe și Atitudini mediate de Plăcere și Utilitate sunt diferite pentru metoda IBL față de INT.

V.3.2. Metodologia utilizată în cadrul studiului [12]

Chestionarul

Principalul scop al studiului despre care vorbim a fost determinarea măsurii în care profesorii cunosc metodele de predare INT și IBL precum și ce atitudine au aceștia legat de aplicarea acestor metode în activitatea de la clasă. Chestionarul include o scară Likert pe șapte nivele pentru a putea surprinde cât mai multe din nuanțele pe care un răspuns le-ar putea cuprinde astfel încât ipotezele să poată fi verificate cu o precizie cât se poate de mare. Din cele trei secțiuni din care este compus chestionarul, prima cuprinde date despre subiecții chestionarului pentru a realiza clasificarea lor în funcție de specializare, grad didactic, vârstă, tip de studii, rezidență, gen. În cea de-a doua secțiune se regăsesc itemii specifici factorilor latenți ai studiului: competențe, atitudinile, percepția utilității, plăcerea. Cea de-a treia secțiune cuprinde întrebări cu răspuns deschis pentru a nuanța și mai mult răspunsurile profesorilor.

Pentru elaborarea chestionarului au colaborat experți în științe ale naturii împreună cu experți în științe ale educației. Aplicarea chestionarului a fost aprobată de Comisia de etică a Universității din București și au fost respectate normele privind protecția datelor personale ale participanților la studiu. Răspunsurile colectate au fost utilizate doar în scopul cercetării de față.

Colectarea datelor și participanții

Colectarea datelor s-a făcut cu dificultate. În primul rând, este vorba de includerea acelei părți a populației „greu de accesat” [107, 108]. Situația creată de pandemia de COVID 19 a impus unele limitări [109], a necesitat adaptarea modalităților de predare la noua situație [110], fiind necesară o adaptare rapidă la realitatea predării online [111]. Toate aceste lucruri au potențialul de a influența rezultatele chestionarului în condițiile unei reveniri la situația pre-pandemică

odată cu încheierea restricțiilor. Pe de altă parte, nu toate practicile și instrumentele utilizate în timpul perioadelor de educație online au fost abandonate după revenirea la școală în format *face to face*. Așadar, colectarea datelor, proiectată inițial ca urmare a unei sesiuni directe, față-n față, a trebuit regândită și făcută utilizând instrumente *online*.

Pentru aplicarea chestionarului online, autorii cercetării s-au documentat în legătură cu toate chestiunile legate de etică, precum obținerea consimțământului, secretizarea datelor personale, confidențialitate [113], iar colectarea datelor nu a început până când autorii nu au fost siguri că sunt îndeplinite toate cerințele legale și etice și până când nu au fost obținute toate aprobările necesare [114 - 116].

Participarea la studiu a fost una voluntară și s-a concretizat prin completarea unui chestionar *online*. Pentru studiul de față au fost intervievați profesori de științe ale naturii (Fizică, Chimie, Biologie), Matematică, Tehnologiei și Informatică/TIC. Procesul de colectare de date s-a întins pe durata a 66 de zile (din 14 noiembrie 2020 până pe 18 ianuarie 2021) - un alt avantaj al aplicării chestionarului online, neexistând presiunea timpului sau a încadrării într-un orar mai strict, ceea ce poate distorsiona rezultatele cercetării. În mesajele transmise potențialilor subiecți ai cercetării, pe lângă apelul la participare, a fost inclusă o adresă URL către chestionarul online, disponibil și în prezent la <https://forms.gle/cSesCawKZm2vutR16>. La colectarea răspunsurilor, după cum am mai precizat, au fost respectate toate măsurile legale sau etice privind datele personale: singurele date personale colectate au fost vechimea la catedră, disciplina predată, gradele didactice, mediul în care se găsește școala din care provin.

În partea de prezentare a chestionarului sunt oferite date despre scopul și contextul cercetării. Împreună cu aceste date, participanților le-a fost oferită o scurtă prezentare privind metodele folosite, modul de completare a chestionarului. De asemenea, cu ajutorul unei prezentări video de 29 minute, autorii au oferit câteva noțiuni de bază privind metodele de studiu STEM și situații concrete de utilizare a metodelor IBL și INT. În total, au fost colectate un număr de 610 răspunsuri, de la 305 profesori STEM și datele au fost analizate pentru a asigura respectarea standardelor de calitate și cantitate ale acestora [112]. Cinci dintre răspunsuri nu au îndeplinit standardele de calitate și, drept urmare, au

fost înlăturate [107]. Astfel, au rezultat câte 300 de răspunsuri valide pentru fiecare dimensiune a predării STEM - IBL și INT.

V.3.3. Rezultatele măsurătorilor studiului

Analiza datelor

Pentru a verifica validitatea și gradul acceptabil de credibilitate al chestionarului aplicat, au fost folosite mai multe metode. În primul rând, validitatea chestionarului a fost determinată de contribuția unor experți din domeniul științelor educației la crearea itemilor. Aceștia au fost supuși analizei unor profesori ai Universității din București, care au stabilit relevanța fiecărui item. Toate valorile corelației item-total au fost mai mari decât valoarea minimă de 0.20 [118]. Doar acei itemi care au îndeplinit toate condițiile necesare au fost incluși în chestionar.

Pentru a analiza rezultatele chestionarului, în cadrul studiului a fost folosită o abordare în trei etape pentru a estima modelele de măsură, modelele structurale și analiza multigrup [114]. Analiza exploratorie a factorilor (*Exploratory factor analysis – EFA*) a fost aplicată întregului eșantion corespunzând atât strategiei IBL cât și INT, cu un total de $N=600$ de răspunsuri valide pentru a oferi validitate chestionarului [117, 119]. Analiza exploratorie a factorilor (EFA) [92] a fost făcută asupra a 26 de variabile, folosind analiza paralelă a metodei factorizării pe axe și a rotației Oblim pentru determinarea numărului de factori relevanți. EFA a fost aplicată pentru a examina relația dintre itemii chestionarului și conceptele teoretice propuse. Aceasta determină validitatea factorilor, ceea ce este parte din validitatea constructului [120]. Ponderile factorilor au fost interpretate prin luarea valorii absolute a fiecărei încărcări și implementarea criteriului sugerat de Comrey și Lee [121]. Valori mai mari de 0.71 sunt considerate excelente, între 0.63 și 0.71 sunt foarte bune, valori între 0.55 și 0.63 sunt bune, valori între 0.45 și 0.55 sunt suficient de bune, iar valorile între 0.32 și 0.45 sunt considerate slabe. Tabachnick și Fidell [122] recomandă ca valoarea de 0.32 să fie pragul minim pentru a identifica încărcături semnificative ale factorilor. Kayser-Meyer-Olkin (KMO) (>0.60 este adecvat) și testele Barlett (semnificative la nivelul 0.05) au fost analizate pentru a afla dacă seturile de date sunt potrivite pentru analiza factorilor. Rezultatele acestor teste au întrunit condițiile întrucât $KMO=0.95$ iar testele Barlett au fost semnificative la nivelul de 0.05. Prin urmare, au putut fi demarate procedurile EFA. Acestea au

suportat o structură predefinită a celor patru factori (competențe, plăcere, utilitate și atitudine). Toate ponderile factorilor rotați asociate dimensiunilor corespunzătoare și toate comunalitățile au fost mai mari decât 0.40 (vezi Tabelul 5.2).

Pe scurt, dimensiunea totală pentru analiza exploratorie a factorilor a fost 600, iar numărul inițial de variabile a fost de 26. Prin urmare, dimensiunea eșantionului este adecvată obținerii unui rezultat credibil [123]. Urmărind analiza factorilor, încărcăturile și comunalitățile prezentate în Tabelul 5.2, observăm în primul rând că nu există variabile cu comunalități scăzute (<0.20) sau încărcări încrucișate, ceea ce indică o structură simplă a factorilor, ușor de explicat. În plus, fiecare factor a avut cel puțin trei încărcări semnificative (>0.40), ceea ce indică faptul că factorii sunt solizi, consistenți [123].

Datorită relevanței mai scăzute (nerespectarea condiției limitei de 0.40), 11 itemi au fost excluși din analiza EFA și au fost păstrați 15 itemi pentru desfășurarea analizei.

Mai departe, am realizat o analiză de confirmare a factorilor (*Confirmatory Factor Analysis – CFA*) folosind programul de modelare a datelor *Smart PLS3* separând cele două eșantioane de date: pentru IBL față de cele pentru INT. Astfel am obținut rezultate separate pentru cele două metode, analiza din prezenta teză concentrându-se, după cum am mai spus, pe abordarea integrată (INT) a predării Fizicii. Raportul dintre *Chi* la puterea a doua (χ^2) și gradele de libertate (*Df*), indicele de fitare comparativă (*Comparative Fit Index – CFI*), indexul de fitare Tucker-Lewis (TLI), eroarea pătratică medie a aproximării (*Root Mean Square Error of Approximation – RMSEA*), rădăcina pătratică medie reziduală standardizată (*Standardized Root Mean Square Residual - SRMR*) au fost indicii de calitate luați în considerare. Pentru abordarea INT, rezultatele CFA indică un model de fit adecvat: $\chi^2/Df=2.88$, $CFI=0.95$, $TLI=0.94$, $RMSEA=0.04$, $SRMR=0.04$. În continuare, au fost calculați pentru fiecare factor coeficienții *Cronbach alpha* pentru a stabili acuratețea instrumentului de sondare, a chestionarului.

În final, am aplicat o modelare cu ecuația celor mai mici pătrate (*partial least squares structural equation modelling – PLS-SEM*) [124, 125] folosind programul *SmartPLS* versiunea 4. În urma acestei modelări, am urmărit să determinăm dacă variabilele latente (Atitudini, Utilitate, Competențe și Plăcere) descriu datele cu acuratețe. Pentru a aprecia fitul modelului am folosit rădăcina

pătrată medie reziduală (SRMR) [73, 126, 127]. Dimensiunile predictorilor au fost determinate folosind mărimea efectelor f^2 . Conform lui Cohen (1988), valori de 0.02, 0.15 și 0.35 ale lui f^2 reprezintă, respectiv, efecte mici, medii și mari [128].

În final, am făcut teste de invarianță pentru a verifica dacă modelul îndeplinește criteriile de invarianță la schimbarea strategiei didactice. Rezultatele măsurării invarianței compozite (*Measurement invariance composite – MICOM*) rezultă pe baza a trei pași: invarianța de configurație, invarianța compozită și egalitatea valorilor medii compozite și ale varianțelor [129]. Rezultatele arată stabilirea unei invarianțe măsurate parțial. În plus, rezultatele permutărilor [130] infirmă ideea că eventualele diferențe ar putea fi consecință a stilului de predare. Analiza exploratorie a factorilor (*Exploratory factor analysis – EFA*), analizele confirmatorii ale factorilor (*Confirmatory Factor Analyses – CFA*) și analiza *PLS-SEM* au fost făcute cu ajutorul programelor de computer Jamovi, Intellectus statistics [131] și SmartPLS.

V.3.4. Rezultate

Pentru o viziune de ansamblu mai clară, în Fig. 5.2, avem o diagramă a factorilor, relațiilor dintre ei și a itemilor care stau în spatele analizei fiecărui factor și ponderea pe care fiecare item o are în definiția factorului respectiv. Este vorba de dreptunghiurile galbene din vecinătatea factorilor, ponderea fiind indicată pe săgețile de legătură.

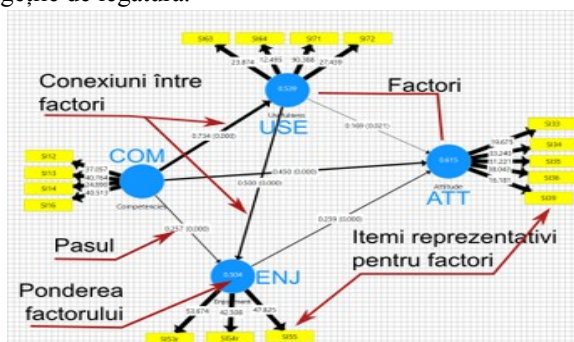


Fig. 5.2 – Diagrama factorilor utilizați în studiul prezentat

În primul rând, se observă că USE și ENJ au o pondere mai mică decât ATT, ceea ce este un rezultat bun – nu este de conceput ca factorii de mediere să aibă o încărcătură mai mare decât factorii principali studiați. De asemenea, se poate observa că legăturile dintre factori, care indică influențele pe care le exercită unul asupra altuia, sunt destul de puternice, semnificative. Dacă o influență puternică a COM asupra ATT era de așteptat, conform literaturii de specialitate, observăm că o influență puternică poate fi observată în legătura COM-USE. O posibilă explicație ar putea fi faptul că profesorii trebuie să-și pregătească temeinic orele de predare. Prin urmare, în lipsa unor competențe specifice domeniului STEM, este de neconceput ca abordările legate de STEM să fie considerate utile de către profesori. O altă influență puternică poate fi observată în legătura USE-ENJ, explicabilă prin faptul că, pentru a depune cu plăcere o anumită activitate, este necesar ca mai întâi activitatea respectivă să fie considerată utilă. Așadar, în luarea unor decizii legate de abordările utilizate, factorul cognitiv primează în fața celui afectiv.

Am investigat un model cu consecințele postulate în modelul PLS-SEM [134]. Rezultatele modelului PLS-SEM corespunzătoare întregului eșantion testat, arată că nici una dintre variabilele demografice luate în calcul (de exemplu, vârsta, gen, grad didactic, rezidență, formări, specializare) nu a avut un impact semnificativ asupra atitudinilor. Referindu-ne la calitatea modelului pentru întregul eșantion/INT, rezultatele studiului arată valori ale R^2 de 0.58/0.59 pentru atitudine, 0.42/0.39 pentru plăcere, 0.48/0.54 pentru utilitate, mai mari decât pragul de 0.1 [135]. Analiza reutilizării aleatorii a eșantionului Stone-Geisser arată o relevanță a valorilor Q^2 mai mare decât 0 [136] atât pentru eșantionul total cât și pentru eșantionul legat de strategia INT. Astfel, atitudinile ($Q^2=0.52$ (eșantion total)/0.52(INT)), plăcerea ($Q^2=0.41$ (eșantion total)/0.38(INT)) și utilitatea ($Q^2=0.47$ (eșantion total)/0.53(INT)) sunt descrise cu succes de modelul cercetării. În plus, rădăcinile pătrate medii standardizate (*standardized root mean square residual* – SRMR) ale eșantionului total (0.06) și INT (0.06) sunt mai mici decât limita de 0.08, ceea ce indică un model de fit bun pentru toate situațiile [135, 136].

Conexiunile prezise sunt semnificative toate, așa cum este arătat în Fig. 5.3. Coeficienții standardizați prezentați în Fig. 5.3 scot în evidență că atitudinea față de metodele de predare STEM este prezisă de percepția utilității ($\beta=0.14$), competențe ($\beta=0.46$) și plăcere/satisfacție ($\beta=0.26$).

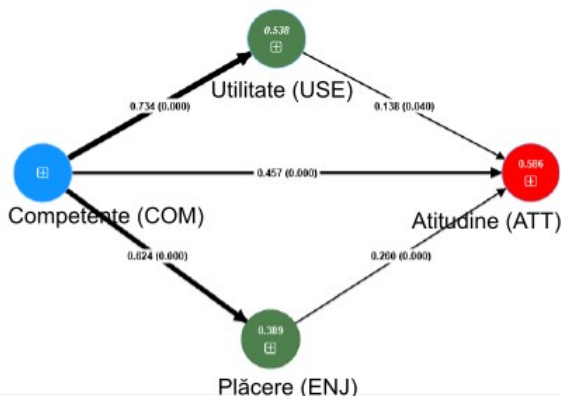


Fig. 5.3 – Modelul Ecuației Structurale a Atitudinii pentru strategia INT (preluat [12])

Rezultatele regresiei directe. Corespondența cu H_1

Regresiile directe au fost analizate pe baza unei valori a lui alpha de 0.05. Rezultatele analizei regresiiilor directe și evaluarea dimensiunilor efectelor variabilelor latente externe și interne aflate în relație directă, sunt prezentate în Tabelul 5.6a (pentru eșantionul total) și b (pentru strategia INT). În Tabelul 5.6, sunt prezentate rezultatele analizei regresiei directe și evaluarea dimensiunilor efectelor variabilelor latente externe asupra variabilelor interne în relație directă.

Conform Tabelului 5.6a, Competențele (COM) influențează în mod semnificativ Atitudinile (ATT). Conform rezultatelor, o creștere de o unitate pentru COM duce la o creștere a valorii estimate a ATT cu 0.47 unități, atât pentru eșantionul total cât și pentru cel dedicat abordării INT. Competențele influențează semnificativ Plăcerea (ENJ) deoarece o creștere de o unitate a valorii COM duce la o creștere de 0.65/0.62 de unități ale valorii ENJ pentru eșantionul total/INT. De asemenea, Competențele influențează semnificativ Utilitatea (USE) întrucât o creștere de o unitate a COM duce la o creștere cu 0.69/0.73 de unități pentru USE. Plăcerea (ENJ) influențează semnificativ Atitudinile (ATT) astfel încât la o creștere de o unitate la ENJ corespunde o creștere de 0.24/0.26 în cazul eșantionului total/INT. Utilitatea (USE) are o legătură puternică cu Atitudinile (ATT), indicând că o creștere de o unitate a USE duce la o creștere de 0.14 unități atât în cazul eșantionului total (IBL+INT) cât și doar a eșantionului INT. După

cum se poate observa, valorile sunt apropiate, indiferent dacă ne referim la eșantionul total sau doar la partea dedicată studiului INT (vezi Tabelul 5.6).

Tabelul 5.6 – Efectele specifice directe și evaluarea dimensiunii efectelor variabilelor latente externe asupra variabilelor endogene în relația lor directă pentru a) eșantionul total și b) abordarea INT

Ipooteza	Conexiunea	Coefficientul conexiunii	Deviația standard STDEV	Statistici T O/STDEV 	Val. p	Dimensiune efect f²	Efect	Rezultatul ipotezei
a) Eșantion total (IBL+INT=600 răspunsuri)								
H11a	Competențe → Atitudini	0.47	0.05	9.97	0	0.25	Mediu	Se verifică
H12a	Competențe → Plăcere	0.65	0.04	17.28	0	0.71	Mare	Se verifică
H13a	Competențe → Utilitate	0.69	0.03	21.55	0	0.91	Mare	Se verifică
H14a	Plăcere → Atitudini	0.24	0.05	4.95	0	0.06	Mic	Se verifică
H15a	Utilitate → Atitudini	0.14	0.05	2.62	0.004	0.02	Mic	Se verifică
b) Răspunsuri pentru metoda INT (300 răspunsuri)								
H11b	Competențe → Atitudini	0.46	0.07	6.46	0	0.22	Mediu	Se verifică
H12b	Competențe → Plăcere	0.62	0.05	12.00	0	0.64	Mare	Se verifică
H13b	Competențe → Utilitate	0.73	0.04	19.76	0	1.17	Mare	Se verifică
H14b	Plăcere → Atitudini	0.26	0.07	3.84	0	0.08	Mic	Se verifică
H15b	Utilitate → Atitudini	0.14	0.08	1.76	0.04	0.02	Mic	Se verifică

Rezultatele modelului de mediere. Corespondența cu H_2

Modelele de mediere au fost realizate pentru a verifica cea de-a doua ipoteză. În Tabelul 5.7 sunt prezentate rezultatele unui model cu mult mai complex constând în relațiile indirecte dintre competențe și atitudini. Pe scurt, au fost realizate teste de mediere pentru a determina dacă USE sau ENJ mediază relația dintre COM și ATT. Rezultatele medierii au fost analizate pe baza unui coeficient alpha de 0.05 și se găsesc în Tabelul 5.7 (a pentru medie, și b pentru INT). După cum am putut observa urmărind rezultatele din Tabelul 5.6, efectul direct al lui COM asupra ATT a fost semnificativ, ceea ce sugerează că o mediere completă prin USE și ENJ nu există, deși putem vorbi de existența uneia parțială.

Conform datelor prezentate în Tabelul 5.7, efectul indirect al USE în relație cu ATT regresat asupra COM a fost semnificativ. Astfel, o creștere de o unitate a valorii COM, bazată pe efectul asupra USE, duce la o creștere a valorii ATT cu 0.1 unități. Efectul indirect al USE în relație cu ATT regresat asupra COM a fost scăzut dar semnificativ statistic. O creștere cu o unitate a COM bazată pe efectul asupra ENJ va crește valoarea ATT cu 0.16 unități. Efectul total al COM asupra ATT a fost semnificativ, o creștere de o unitate a COM ducând la o variația a ATT de 0.72. Așadar, întrucât se verifică medierea parțială, ipoteza H_2 se verifică.

Tabelul 5.7 – Efectele indirecte specifice pentru: a) eșantionul total și pentru b) INT

Ipoteza	Conexiunea	Coeficientul efectului in- direct	Abaterea standard (STDEV)	Statistici T (O/STDEV)	Valorile p	Rezultatul ipotezei
a) Eșantion total						
H21a	Competențe → Plăcere → Atitudine	0.15	0.03	4.65	0.001	Mediere parțială
H22a	Competențe → Utilitate → Atitudini	0.10	0.04	2.58	0.005	Mediere parțială
b) INT						
H21b	Competențe → Plăcere → Atitudine	0.16	0.05	3.53	0.001	Mediere parțială
H22b	Competențe	0.10	0.06	1.75	0.040	Mediere

mare parte din realitatea care ne înconjoară s-a mutat în spațiul virtual, aplicații precum cele realizate pe calculator sunt binevenite [43, 70].

c) Relația indirectă dintre competențe și atitudini

Studiul prezentat în această teză subliniază influența mediatore simulană a plăcerii și utilității față de adoptarea unei noi strategii care împărtășește puncte comune cu adoptarea tehnologiilor digitale în actul de predare-învățare. Astfel, rezultatele cercetării arată că percepția utilității (USE) joacă un rol mediator între competențe (COM) și atitudini (ATT) dar rolul acesta este mai mic decât cel al plăcerii/satisfacției (ENJ). Acest rezultat arată că atitudinile profesorilor față de strategiile de predare STEM sunt influențate mai degrabă de factorii afectivi și mai apoi de către cei cognitivi. Aceasta în condițiile în care este bine-cunoscut faptul că atitudinile reprezintă factorii cognitivi și afectivi care influențează comportamentul [141, 142]. Prezentul studiu arată că factorul cel mai important care influențează atitudinile este percepția lor asupra nivelului de cunoștințe, urmată de plăcere și de percepția utilității. Fără convingerea profesorului că metoda aleasă va avea un impact pozitiv asupra procesului de predare, el nu va implementa metoda, oricât de tentantă ar fi din punct de vedere cognitiv. Acesta este motivul pentru care, în studiul de față, ENJ are un mic avans față de USE privind influența relației dintre COM și ATT. Din nou, rezultatele cercetării de față confirmă alegerea temei tezei de față. Într-adevăr, pentru a determina o atitudine pozitivă față de adoptarea unor metode și mijloace de predare-învățare STEM, toate pleacă de la COM, dar am demonstrat că lucrurile trec și prin USE și ENJ. Oferind drept model instrumentele prezentate în teza de față, consider că ambele variabile mediatore sunt atinse. În primul rând, plăcerea/satisfacția vine odată cu observarea unui interes sporit al elevilor față de învățarea Fizicii. Acest interes, așa cum am arătat în capitolele precedente, poate fi crescut atât prin abordările conceptuale (Capitolul II), experimente reale sau virtuale (Capitolul III) sau experimente în care elevii să poată construi și verifica dispozitivul experimental (Capitolul IV). De asemenea, prin activități practice, de laborator real sau virtual, este asigurată partea legată de percepția utilității prin sublinierea legăturii cu viața reală. Dacă dezvoltarea competențelor ține de alegerile profesorilor în ceea ce privește dezvoltarea profesională sau ascensiunea în carieră, prin abordările propuse în prezenta teză apelăm la cei doi factori mediatori care duc, așa cum o demonstrează rezultatele studiului, la o

atitudine pozitivă a profesorilor față de adoptarea metodelor de predare-învățare STEM.

c) Limitări ale studiului și sugestii pentru viitoare cercetări

Studiul prezentat are câteva limitări comune oricărei cercetări de acest gen. În primul rând, repondenții se raportează la propriile atitudini și preconcepții, ceea ce duce la posibile influențe [143]. O altă limitare este legată de faptul că specializările subiecților cercetării sunt disproporționate - majoritatea repondenților au fost profesori de Fizică. Acest fapt se datorează mai multor factori: metodele INT sunt utilizate în mod diferit de profesori care predau discipline diferite. În studiul de față, profesorii chestionați au fost aleși din aria științelor naturii și tehnologiilor. Motivele pentru care printre repondenți se numără mai mulți profesori de Fizică, țin de faptul că aceștia sunt mai deschiși în a utiliza metode de predare STEM. Fizica este liantul dintre diferitele elemente ale abordărilor STEM, deci găsirea unor elemente transdisciplinare este mai firească în cazul profesorilor de Fizică decât în cazul celor care predau alte discipline.

d) Concluziile studiului

Principalul rezultat al studiului prezentat ține de faptul că relația dintre Competențele profesorilor și Atitudinile lor privind metodele de predare STEM sunt parțial mediate de Percepția utilității și, în egală măsură, de Plăcere. Chiar dacă rezultatele arată că efectul COM asupra USE și ENJ este puternic, efectul direct al factorilor USE și ENJ asupra ATT este redus. Acest lucru întărește ideea că atitudinea profesorilor este influențată în primul rând de competențele lor și nu de avantajele pe care aceștia le-ar putea avea din folosirea metodelor respective de predare.

În concluzie, studiul de față relevă, pe scurt, faptul că atitudinea profesorilor privind utilizarea metodelor de predare specifice abordărilor STEM este influențată de competențele acestora, iar această relație este mediată, la rândul ei, semnificativ, de percepția utilității și a plăcerii, satisfacției pe care aceste metode le pot aduce în procesul didactic. Teza de față răspunde acestor provocări prin prezentarea unor instrumente didactice din sfera STEM utile predării Fizicii la nivel preuniversitar. Modul în care tema aleasă pentru teză este conformă cu rezultatele studiului ține de următoarele:

1) abordarea graduală a unor instrumente, de la simplu la complex. Aici, există două aspecte: în primul rând, instrumentele prezentate urmează o curbă

ascendentă a complexității privind modul în care ele sunt realizate și modul în care sunt utilizate. Astfel, *Whiteboard animation* este un instrument destul de simplu, ușor de utilizat, nefiind necesare cunoștințe sau instrumentar avansate. Pe de altă parte, trecând prin lucrări clasice de laborator, dar utilizând instrumentar alternativ și ajungând la a proiecta, construi și experimenta cu propriul instrumentar, gradul de complexitate este în continuă creștere. În al doilea rând, vorbim despre cunoștințele teoretice care stau în spatele diferitelor instrumente prezentate. Este adevărat că în partea legată de *Whiteboard animation* sunt prezentate teme din Teoria Relativității, noțiuni foarte complexe, dar ele sunt prezentate la nivel conceptual. Pe măsură ce avansăm pe firul tezei, noțiunile de Fizică implicate sunt tot mai complexe. În acest fel, urmărind o astfel de abordare, un profesor poate să-și mărească motivația privind utilizarea unor astfel de instrumente și strategii STEM prin înțelegerea utilității lor, prin descoperirea satisfacției și, nu în ultimul rând, prin dezvoltarea competențelor în domeniu.

2) instrumentele prezentate în teză sunt preponderent digitale, fapt care le face foarte atractive în contextul actual în care digitalizarea face parte din cotidian. Pe de altă parte, nu este neglijată nici partea experimentală, conectată direct cu realitatea. Acești factori sunt, de asemenea, de natură a crește motivația adoptării metodelor de predare STEM în activitatea cotidiană.

3) subiectele alese sunt legate de viața reală, cu aplicații practice, interesante, ceea ce duce la o creștere a plăcerii de a utiliza astfel de metode și a sentimentului de utilitate.

Așadar, teza de doctorat propusă, „*Abordări STEM utile învățării/înțelegerii Fizicii la nivel preuniversitar*”, prin conținuturile ei, se află în deplină concordanță cu rezultatele acestui studiu prin faptul că propune dezvoltarea unor instrumente care să ducă la o creștere a calității predării Fizicii la nivel preuniversitar și la o adoptare mai largă a metodelor care țin de abordările STEM.

Concluzii

Pe parcursul acestei lucrări am prezentat câteva instrumente STEM aplicate în scopul eficientizării studiului Fizicii. Instrumentele sunt realizate pe parcursul activității de cercetare depuse în cadrul Școlii Doctorale a Facultății de Fizică, Universitatea din București. Instrumentele cuprind o largă paletă de fenomene studiate, de la probleme de relativitate restrânsă până la mecanica fluidelor și, de asemenea, sub forme foarte variate, de la prezentări video sub forma *Whiteboard animation* până la laboratoare virtuale sau kituri experimentale. Fără îndoială, posibilitățile sunt infinit de variate, abordările STEM oferind un teren foarte vast, dacă este să vorbim despre instrumente de studiu al Fizicii. Toate instrumentele prezentate au fost confirmate din punct de vedere științific prin publicarea lor în revista *Romanian Reports in Physics* sau în *proceedings* ale unor conferințe internaționale.

Realizarea instrumentelor didactice a fost doar un pas dintr-un proces mult mai îndelungat: aplicarea lor la clasă, pentru a le proba eficiența, valabilitatea și, eventual, pentru a face ajustările necesare optimizării lor. Urmare a aplicării instrumentelor la clasă, am putut trage următoarele concluzii:

- privitor la *Whiteboard animation*, ele s-au dovedit foarte utile în prezentarea elementelor introductive ale Teoriei Relativității Restrânse. Abordarea conceptuală, calitativă a fenomenelor ajută elevii să înțeleagă fenomenele studiate și creează premisele unui studiu mai aprofundat al acestor noțiuni. În plus, fenomenele au putut fi studiate de către fiecare elev în ritm propriu și au avut posibilitatea de a relua filmele ori de câte ori a fost nevoie. Acest lucru a dus la un interes crescut privind fenomenele studiate, acesta fiind stimulat atât de ineditul problemelor prezentate cât și a modalității de prezentare care le-a stimulat creativitatea. În plus, în condițiile învățământului *online*, astfel de instrumente devin foarte utile în procesul de predare-învățare. Acest instrument este util pentru că arată elevilor fenomenele în profunzime, le dezvăluie conceptele fundamentale ale acestora. Odată înțeles fenomenul, aplicarea lui, introducerea aparatului matematic, legătura cu evenimentele din viața de zi cu zi devin mai ușoare.

- privind utilizarea Arduino și Tracker în efectuarea unor măsurători de laborator, ambele au avut un impact deosebit. Prin implicarea în proiectarea și realizarea unor instrumente pe baza platformei Arduino, elevii pot să înțeleagă

funcționarea unor dispozitive electronice mai complexe, pe de o parte, iar pe de altă parte ei pot înțelege modul în care se face un *setup* experimental astfel încât rezultatele experimentului să fie cât mai concludente. Programul de analiză video Tracker le demonstrează elevilor cât de simplu pot utiliza un dispozitiv electronic pentru a efectua măsurători de laborator cu rezultate acceptabile. Pornind de la acest exemplu, se pot construi și alte dispozitive în care să fie folosite instrumente tot mai comune, precum telefoanele inteligente sau tabletele. În acest fel învățarea STEM devine operațională: dispozitivele de tip Arduino sunt profund conectate cu tehnologia și ingineria, proiectarea dispozitivelor ținând tot de inginerii. La acestea se adaugă faptul că sunt studiate fenomene naturale, deci, studiul Științelor este asigurat. Alături de acest tip de instrumente, programul Tracker ține de învățarea STEM prin modul în care sunt culese datele (capturi video care presupun proiectarea și realizarea unui dispozitiv experimental convenabil) și prin modul în care datele sunt interpretate. Sunt folosite pentru această parte programe de calculator cu ajutorul cărora sunt puse în evidență mărimi fizice.

- GeoGebra, un alt program care poate fi utilizat pentru studiul unor fenomene fizice, sau pentru simularea unor dispozitive reale, aduce în prim plan împletirea dintre fenomenul fizic și aparatul matematic care îl descrie. Faptul că elevii pot vedea ce se află în spatele unor determinări contribuie la această înțelegere.

- Laboratoarele virtuale reprezintă un alt instrument prețios în procesul de predare-învățare STEM. Există dispozitive experimentale, precum tunelul aerodinamic, care sunt greu de deținut într-un laborator școlar și destul de dificil de manipulat. Folosind tunelul aerodinamic bazat pe softul COMSOL Multiphysics, depășim acest neajuns. Elevii pot participa la stabilirea condițiilor de derulare a experimentului și la analizarea rezultatelor calitative și cantitative.

- Imprimare 3D și realizarea unui kit experimental reprezintă un alt instrument care implică domeniul STEM. Aici cunoștințele ingineresti și tehnologice sunt aduse în prim-plan. Mai departe, odată depășită această etapă, elevii pot efectua măsurători și interpreta rezultatele acestora, lucru care dezvoltă foarte mult competențele tinerilor în tehnologie și inginerie.

În primul capitol, *Repere teoretice ale abordării învățării STEM*, am prezentat principalele concepte de lucru și am argumentat motivația alegerii temei de cercetare a prezentei teze. Deși este folosit pe scară foarte largă, conceptul de STEM nu este pe deplin înțeles, sau admite mai multe accepțiuni în literatura de

specialitate. Unul dintre obiectivele pe care mi le-am propus, pe lângă proiectarea, realizarea și aplicarea unor instrumente STEM care să facă predarea Fizicii mai eficientă, a fost și clarificarea acestor noțiuni. Astfel, din punctul de vedere al profesorului de Fizică, profesor care predă în învățământul secundar, conceptul de STEM se referă mai degrabă la o abordare integrată, în care sunt îmbinate noțiuni care țin de domenii diverse – Științe, Tehnologii, Inginerii sau Matematică – dar care nu pot exista absolut independent. Argumentele în favoarea motivației alegerii temei acestei teze țin, așadar, de necesitatea schimbării paradigmei atunci când vorbim despre metode și instrumente de predare în domeniul STEM în general și a Fizicii în special, pe de o parte, și pe de altă parte de necesitatea formării și atragerii unui număr cât mai mare de elevi către domeniile STEM, datorită deficitului mare de persoane pregătite să susțină progresul tehnologic din ultimii ani.

În cel de-al doilea capitol – *Rolul conceptelor fundamentale de Fizică în învățarea STEM* – am prezentat *Whiteboard animation* ca instrument pentru predarea noțiunilor introductive de teoria relativității restrânse. Este o suită de trei animații care debutează cu *Whiteboard Animation – A Way to Ease the Understanding of Special Theory for the Relativity Principles Consequences*, autori B. Chiriacescu, et. al, publicată în *Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Learning*, Bucharest, 2020, în care sunt prezentate postulatele Teoriei relativității restrânse și relativitatea simultaneității. Urmează alte două, *Whiteboard Animation – A Tool for Teaching the Special Theory of Relativity*, autori B. Chiriacescu, et al, publicată în *Proceedings of the TIM International Physics Conference, TIM19*, AIP Conference Proceedings 2218, 060006 (2020) și *The Garage Paradox Presented By Means Of Whiteboard Animation*, autori B. Chiriacescu, et al, publicată în *Proceedings a Internațional Conference of Virtual Learning, Bucharest, 2021*. În aceste două lucrări, abordând două probleme foarte bine cunoscute, respectiv, „paradoxul gemenilor” și „paradoxul garajului”, probleme care sunt de natură a trezi interesul elevilor, sunt discutate principalele consecințe ale Postulatelor lui Einstein: relativitatea simultaneității, relativitatea duratelor și relativitatea distanțelor. An de an, predarea acestor Postulate ale TRR și a consecințelor lor ridică probleme deosebite datorită faptului că este foarte dificil să ne desprindem de modul de gândire clasic, în care lucruri precum timpul sau distanțele au caracter absolut. Cu ajutorul acestui instrument – *Whiteboard animation* – care se bazează pe

abordarea calitativă, fenomenologică a noțiunilor de bază, am putut observa cel puțin un interes sporit din partea elevilor și o rată mai mare de succes în înțelegerea acestor noțiuni. La acest rezultat contribuie următorii factori:

- esențializarea problemei și prezentarea ei sub forma unei povești sau anecdote este de natură a trezi interesul elevilor și a-i face mai receptivi la conținutul științific;

- *Whiteboard animation* este un instrument care implică mai multe simțuri (vizual, auditiv), ceea ce este în acord cu faptul că persoane diferite au stiluri de învățare diferite;

- plecând de la ideea că fiecare persoană are propriul ritm de învățare, *Whiteboard animation* ajută și din această perspectivă. Materialul poate fi distribuit online, iar elevul poate să-l ruleze ori de câte ori simte nevoia, adaptând astfel procesul de învățare la ritmul de învățare propriu;

- am discutat despre importanța învățământului *online* și despre faptul că, în anumite situații, acesta poate fi o alternativă viabilă a învățământului tradițional, sau, de preferat, un element complementar al acestuia. *Whiteboard animation* este un instrument care se pretează foarte bine la învățământul *online*, iar experiența ultimilor ani a confirmat-o din plin;

- fiind un instrument cu valențe artistice, *Whiteboard animation* stimulează creativitatea elevilor, ceea ce reprezintă unul dintre dezideratele unui învățământ modern, bazat pe competențele secolului XXI. În plus, elevii pot fi cooptați la realizarea unor astfel de materiale sau pot fi învățați să facă ei înșiși propriile versiuni.

După ce în cel de-al doilea capitol am prezentat un instrument care să ofere elevilor o privire de ansamblu asupra noțiunilor de Fizică, să capteze interesul acestora pentru studiul mai aprofundat al conceptelor, în capitolul al treilea – *Argumentarea experimentală a abordărilor STEM în învățarea noțiunilor de Fizică în liceu* – analizez unele instrumente de învățare STEM, a unor fenomene fizice și măsurători de laborator. Este vorba de experimente cunoscute, partea originală fiind modul în care acestea se derulează, modul în care sunt făcute determinările experimentale. Am abordat montajele experimentale din mai multe perspective:

1. O abordare foarte tehnică, cu dispozitive electronice controlate de calculator. Este vorba de folosirea unui dispozitiv de măsurare a unor perioade de

oscilație bazat pe un montaj electronic conectat la o platformă Arduino, dispozitiv cu ajutorul căruia am măsurat accelerația gravitațională folosind pendulul Kater.

2. O abordare hibrid, în care datele sunt culese cu ajutorul unui instrument de înregistrare video (poate fi o cameră video, dar poate fi utilizată și camera aflată în dotarea unui *smartphone*), iar interpretarea acestora se face cu ajutorul unui program de calculator – Tracker, program de analiză video și de modelare.

3. O abordare bazată aproape în totalitate pe calculator, folosind un alt program dedicat educației, Geogebra. Sigur, și în cazul acestei aplicații se pleacă de la niște date culese de un anumit instrumentar, dar procesul de triangulație folosit este complet automatizat.

Primele două abordări sunt prezentate în lucrarea *Arduino and Tracker video - didactic tools for study of the Kater pendulum physical experiment* autori B. Chiriacescu, et al, publicat în *Romanian Reports in Physics* 72, 901. Cel de-al treilea instrument, bazat pe Geogebra, se bazează pe lucrarea *GeoGebra application, used in the determination of the magnitude of an earthquake*, autori B. Chiriacescu, et al, publicată în *New Trends and Issues Proceedings on Humanities and Social Sciences*, 6 (1), 2019.

Construirea montajului experimental cu includerea dispozitivului Arduino este un exemplu elocvent de abordare STEM. Aici științele sunt prezente prin studiul fenomenului, tehnologia și ingineria prin construirea dispozitivului pentru măsurarea timpilor, în scrierea programului care comandă funcționarea dispozitivului, iar matematica este prezentă în faza de interpretare a datelor. Sigur că, experimentul ales, determinarea accelerației gravitaționale utilizând pendulul Kater, este peste nivelul cunoștințelor din curriculumul elevilor de liceu, dar modelul poate fi studiat în cadrul centrelor de excelență sau poate fi aplicat și la alte tipuri de experimente, de la studiul pendulului de torsiune [55, 58] al celui matematic, sau al celui elastic, până la studiul mișcării rectilinii. Ideea este că elevii pot fi cooptați la proiectarea și construirea dispozitivului experimental și mai ales a dispozitivului de înregistrare bazat pe platforma Arduino. În acest fel, experiența devine una transdisciplinară, oferind elevilor o privire mai de ansamblu asupra experimentului și a fenomenului studiat. Spre deosebire de dispozitivele de înregistrare clasice, elevii pot înțelege ce se află în spatele acestor înregistrări, factorii care le influențează și de care trebuie ținut cont pentru a avea un experiment de succes.

A doua perspectivă, aceea a folosirii programului Tracker ca parte integrantă a unui studiu experimental, este un pas către digitalizarea experimentului. Da, avem un dispozitiv real – din nou pendulul Kater – dar acum determinările sunt făcute cu ajutorul unei analize video oferite de programul Tracker. Un prim avantaj al acestei abordări îl constituie faptul că necesită dotări minimale. Într-adevăr, pe lângă dispozitivul experimental în sine, mai este nevoie de o cameră video suficient de performantă pentru a obține înregistrări de bună calitate și de un computer. Programul Tracker este gratuit, deci nu se pune problema unor costuri suplimentare pentru achiziționarea acestuia. Acest fapt îl face utilizabil de către elevi în orice circumstanță, atât la școală cât și acasă, în experimente pe care ar dori să le facă singuri, sau să reproducă, acolo unde este posibil, experimente realizate în laborator. Pe lângă aceste avantaje, introducerea și utilizarea acestui instrument la clasă mai prezintă avantajul că experimenterii, elevii, au acces la seturi de date foarte complexe. În acest fel, ei pot urmări legăturile dintre diverse mărimi fizice, modul în care evoluția unei anumite mărimi fizice este influențată de altele, modul în care ele sunt interconectate.

În articolul *Arduino and Tracker video - didactic tools for study of the Kater pendulum physical experiment* am demonstrat că aceste două instrumente sunt valide, rezultatele obținute fiind satisfăcătoare. Aceste rezultate le validează ca fiind instrumente ce pot fi utilizate în procesul de predare-învățare al Fizicii la nivel de liceu.

Cel de-al treilea instrument, construit cu ajutorul programului Geogebra, este un instrument complet digitalizat. Sigur, datele sunt culese fie dintr-o seismogramă construită în scop didactic, fie dintr-o seismogramă reală, dar prelucrarea acestora este realizată cu ajutorul programului construit cu Geogebra. Programul este lesne de parcurs de către elevi și le oferă acestora, pe lângă modalitatea de determinare a magnitudinii unui cutremur, și modalitatea în care trebuie să descifrăm o seismogramă, și să extragem informațiile din aceasta. Mai mult decât atât, elevii pot vedea aparatul matematic care stă în spatele acestor determinări și a programului în sine. Acest lucru prezintă un avantaj deosebit, întrucât, așa cum am spus-o și mai devreme, principala problemă a predării materiilor STEM este faptul că de multe ori acestea sunt tratate separat fără a fi evidențiate conexiunile dintre ele și locurile unde acestea se întrepătrund. Așadar, cred că, arătând elevilor că un fenomen natural, seismul, în timpul căruia se înregistrează grafic, în mod automat, momentul, durata și amplitudinea mișcărilor

seismice cu seismograful, poate fi studiat pe baza unor ecuații matematice și a unui soft, este de natură a demonstra acestora că elementele STEM sunt într-o relație de interdependență.

În cel de-al patrulea capitol – *Integrarea învățării STEM pentru studiul dinamicii fluidelor* - am propus modalități în care elevii să-și poată manifesta creativitatea proiectând propriile dispozitive, pe care să le testeze atât într-un mediu virtual cât și într-unul concret, al laboratorului. Conținutul capitolului se bazează pe articolele *Modelling of a Vertical Wind Turbine in The Virtual Lab* autori B.Chiriacescu, et al, *Romanian Reports in Physics*, 73(1) 901, 2021 și *Building and testing a wind turbine experimental kit for students*, autori B. Chiriacescu, et al, *Romanian Reports in Physics*, 73(3), 2021 și lucrarea *Virtual and experimental aerodynamic study for student's lab* autori B. Chiriacescu, et al, publicată în proceedings la *Internațional Conference on Virtual Learning*, 2020.

Astfel, am considerat că o abordare graduală, de la simplu la complex, și de la virtual la real este cea mai bună pentru a forma competențele necesare elevilor. În acest sens, procesul începe cu studiul comportamentului diferitelor forme geometrice într-un tunel aerodinamic virtual construit în programul COMSOL Multiphysics. Formele respective pot fi construite și manipulate cu ajutorul programului FreeCAD. În acest fel, elevii se familiarizează cu programele, înțeleg principiul de funcționare a tunelului aerodinamic și cunosc câteva elemente teoretice care stau în spatele funcționării acestui tunel aerodinamic. De asemenea, ei pot înțelege ce determinări calitative și cantitative pot fi făcute cu ajutorul programului COMSOL Multiphysics. Legat de programul FreeCAD, pornind de la proiectarea, construirea și folosirea unor corpuri geometrice simple, elevii exersează operarea cu un instrument ingineresc – desenul tehnic. Pasul următor îl reprezintă trecerea la nivelul următor de dificultate, respectiv, construirea și studierea unor forme mai complexe, în cazul de față niște modele de turbine eoliene foarte simple. În acest stadiu, fabricarea modelului este mult mai dificilă și necesită abilități sporite. De asemenea, culegerea și interpretarea datelor este mult mai complexă, dar în acest fel elevii pot avea o imagine clară a fenomenului fizic. Fiind vorba de fenomene greu de urmărit și evaluat, respectiv, fenomene aerodinamice, în care dimensiunile particulelor implicate (aerul) sunt minuscule, iar vitezele lor sunt foarte mari, informațiile pe care le putem obține din aceste studii în tunelul aerodinamic virtual sunt relevante pentru punerea lor în practică. Pe lângă aceasta,

laboratoarele virtuale suplinesc cu succes laboratoarele reale în anumite situații și cu anumite limitări. Sigur, dacă vorbim despre lucrări de cercetare, o simplă confirmare a unui fenomen studiat într-un laborator virtual nu este satisfăcătoare. Dar dacă vorbim despre laboratoare didactice, atunci ele devin cât se poate de prețioase, cu atât mai mult cu cât nu orice laborator școlar poate avea anumite dotări materiale. Etapa următoare este trecerea la laboratoarele reale. În cazul prezentat, pentru început, este vorba de studierea comportării unor forme geometrice simple în tunelul aerodinamic. Această etapă este importantă, în primul rând pentru a confirma faptul că rezultatele obținute în laboratorul virtual sunt verificabile și în realitate și pentru ca elevii să se familiarizeze cu instrumentarul de laborator, cu modul de culegere și interpretare a datelor experimentale.

În fine, ultimul stadiu, cel mai amplu este cel în care formele complexe proiectate mai devreme, modelele de turbine, vor fi construite și testate în laborator. Fiind vorba de modele la scară redusă, pentru construirea acestora am apelat la imprimarea 3D. Este o tehnologie de ultimă oră, foarte spectaculoasă, cu ajutorul căreia pot fi obținute forme complexe. Elevii pot fi antrenați în operațiunea de proiectare, putând astfel să înțeleagă principiile conform cărora se realizează o astfel de construcție. Verificarea modelelor în laborator este o etapă extrem de importantă. Aici se poate discuta impactul pe care orice factor al dispozitivului experimental îl poate avea asupra rezultatelor, modul în care rezultatele experimentului virtual se confirmă sau nu, cauzele eventualelor diferențe. Toate aceste elemente sunt de natură să le ofere elevilor competențe STEM și să le trezească interesul pentru învățarea STEM. Pe lângă competențele strict inginerești sau tehnologice, legate de proiectarea și construirea modelelor utilizate, de manipularea dispozitivelor experimentale, elevii au posibilitatea să înțeleagă fenomenele fizice studiate.

Pentru verificarea validității abordărilor propuse în această teză, împreună cu un colectiv de cercetare, am întreprins o analiză a factorilor care influențează adoptarea metodelor de predare STEM de către cadrele didactice. Rezultatele cercetării au fost publicate în articolul „*Secondary teachers' competencies and attitude: A mediated multigroup model based on usefulness and enjoyment to examine the differences between key dimensions of STEM teaching practice*”, F.S. Chiriacescu, B. Chiriacescu, et al, (2023) PLOS ONE. Așa cum am arătat în capitolul V - *Factori care influențează atitudinea profesorilor privind*

adoptarea metodelor de predare STEM, pe lângă competențe, atitudinea profesorilor privind aplicarea unei anumite metode de predare este influențată și de alți factori, interni și externi: percepția utilității și satisfacția pe care utilizarea metodei respective o aduce. Pentru a verifica modul în care profesorii se raportează la metodele de predare caracteristice STEM, am aplicat unui număr de 300 de profesori de Științe (Fizică, Chimie, Biologie), Matematică și din aria Tehnologiei un chestionar online, cu întrebări care se refereau atât la metoda Investigației (IBL) cât și la abordarea integrată a disciplinelor STEM (INT). Rezultatele au fost relevante, cel puțin în ceea ce privește partea direct conectată cu această teză - abordările INT – și arată că relația deja cunoscută dintre competențe (COM) și atitudini (ATT) este mediată de percepția utilității (USE) și de satisfacția resimțită (ENJ). Mai mult, pentru abordările STEM percepția utilității influențează atitudinea aproape la fel de mult ca satisfacția. Acest rezultat poate fi explicat prin aceea că aplicarea unei abordări STEM depinde în primul rând de cât de util este instrumentul care urmează a fi aplicat. Dar utilitatea nu poate fi disociată nivelul de satisfacție. Așadar, rezultatul studiului confirmă justetea alegerii firului roșu al prezentei teze.

Astfel, în structura acestei teze, după ce am făcut o introducere în subiectul de studiu cu *Whiteboard animation*, fac o prezentare a aplicațiilor practice, pendulul Kater și aplicații ale noțiunilor de seismologie cu software-ul Geogebra, folosind moduri de lucru prin abordări STEM. La nivelul următor, am proiectat și construit diverse dispozitive pentru studiul aplicat al Fizicii folosind atât instrumente virtuale cât și reale, precum imprimarea 3D și tunelul aerodinamic. În acest fel, sunt evidențiate utilitatea, aplicabilitatea noțiunilor studiate, dar am observat și sporirea gradului de satisfacție, inerente atingerii unui rezultat concret, palpabil și viabil. Rezultatul nu poate fi decât o creștere a interesului profesorilor în a construi instrumente similare, specifice STEM, și a aplica astfel de abordări în activitatea de zi cu zi.

Pe lângă instrumentele realizate și prezentate în teza de față, preocuparea pe care am avut-o pe parcursul școlii doctorale s-a concretizat prin participarea și la alte teme de cercetare, studii publicate în articole de specialitate sau prin lucrări prezentate la conferințe internaționale. Astfel, dezvoltarea de aplicații de seismologie cu ajutorul programului Geogebra am extins-o și la determinarea coordonatelor unui cutremur prin metoda razelor (F. Chiriacescu, B. Chiriacescu, C. Miron (2019) *Didactic instrument developed in geogebra for the*

determination of the coordinates of an earthquake based on an inquiry based learning method, Proceedings of the 15th International Scientific Conference "eLearning and Software for Education", (2019). Folosirea Arduino și Tracker ca instrumente alternative de măsură în laborator au dus și la alte cercetări pe lângă cea prezentată în Capitolul III. Este vorba de lucrările *Dynamic study of torsion using Tracker software*, Romanian Reports in Physics **72**(3), 904 (F.S. Chiriacescu, B. Chiriacescu, et al. (2020)) și *Arduino Setup Used as Didactic Tool for the Dynamic Study of Torsion*, Proceedings of the 15th International Conference on Virtual Learning ICVL (F. Chiriacescu, B. Chiriacescu, et al. (2020)). O combinație interesantă de instrumente alternative (Audacity și KDenlive) am studiat-o în *Acoustic resonators - a method for online study in determining the speed of sound in air*, Romanian Reports in Physics **73**(2) 904 (F.S. Chiriacescu, B. Chiriacescu, et al. (2021)). În fine, un instrument didactic complex, util oricărui profesor care predă discipline STEM, este harta conceptuală. Chiar dacă acest instrument nu se regăsește în teza de față, participarea la cercetări legate de acesta m-au ajutat la sintetizarea ideilor prezentate aici. Este vorba de lucrările *Using Conceptual Map for a Better Understanding of Circular Motion*, publicată în American Institute of Physics Conference Proceedings Series (AIP-CP) (F. Chiriacescu, B. Chiriacescu, et al. (2020)), *Cmap Tools and Tracker used for studying the harmonic oscillator*, Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Learning, (F. Chiriacescu, B. Chiriacescu et al. (2019)) și *Using Conceptual Maps and Free Open-Source Applications for Seismology Studies at High School Level*, 16th International Conference on Virtual Learning ICVL, (F-S Chiriacescu, B. Chiriacescu, et al. (2021)).

Pornind de la faptul că Fizica și disciplinele STEM nu se mai află de mult în topul preferințelor elevilor, cu toate că este atât de mare nevoia de specialiști în aceste domenii, consider că un set de instrumente precum cele prezentate în această teză este de natură să ușureze misiunea profesorului de Fizică, să facă noțiunile predate mai abordabile și să formeze competențele elevilor din acest domeniu. Desigur, fiecare dintre instrumentele prezentate poate fi adaptat astfel încât să fie aplicat și altor fenomene sau capitole din Fizică. Cele din lucrarea de față reprezintă doar niște modele, niște puncte de plecare.

Bibliografie

- 1 F. Korkmaz (2018) The STEM education and its reflection on the secondary school science lesson draft curriculum, *Pegem Journal of Education and Instruction* **8**(3), 439–468.
- 2 J.H. Bray (2010) Psychology as a core science, technology, engineering, and mathematics (STEM) discipline, *Washington DC: American Psychological Association*.
- 3 E. Saxton, R. Burns, S. Holveck, S. Kelley, D. Prince, N. Rigelman, E.A. Skinner (2014) A common measurement system for K-12 STEM education: adopting an educational evaluation methodology that elevates theoretical foundations and systems thinking, *Studies in Education Evaluation* **40**, 18–35.
- 4 <http://www.romaniaeducata.eu/wp-content/uploads/2021/07/Raport-Romania-Educata-14-iulie-2021.pdf>.
- 5 <http://programe.ise.ro/Actuale/Gimnaziu-2017.aspx>.
- 6 <http://programe.ise.ro/Actuale/Programeinviagoare.aspx>.
- 7 N. Tsupros, R. Kohler, J. Hallinen (2009) STEM education: A project to identify the missing components, Pennsylvania: Intermediate Unit 1: Center for STEM Education and Leonard Gelfand Center for Service Learning and Outreach, Carnegie Mellon University, 11-17.
- 8 M.S. Khine (2019) STEAM education, *Springer Berlin Heidelberg*.
- 9 R. Bybee (2013) The case for STEM education: Challenges and opportunities, *USA: NSTA Press*.
- 10 C.C. Johnson, M.J. Mohr-Schroeder, T.J. Moore, L.D. English (2020) Handbook of research on STEM education, *Routledge*.
- 11 M.A.H. Bunyamin, C.A. Talib, N.J. Ahmad, N.H. Ibrahim, J. Surif (2020) Current teaching practice of physics teachers and implications for integrated STEM education, *Universal Journal of Educational Research*, **8**(5A), 18–28.
- 12 F.S. Chiriacescu, **B. Chiriacescu**, A.E. Grecu, C. Miron, I.O. Pânișoară, I. Lazăr (2023) Secondary teachers' competencies and attitude: A mediated multigroup model based on usefulness and enjoyment to examine the differences between key dimensions of STEM teaching practice, *PLOS ONE* **18**(1) e0279986.
- 13 J. Air, E. Oakland, C. Walters (2015) *The secrets behind the rise of video scribing*, Sparkol Books, Bristol, UK.
- 14 S. Türkay (2016) The effects of whiteboard animations on retention and subjective experiences when learning advanced physics topics, *Computers & Education* **98**, 102–114.
- 15 R.E. Mayer (2002) Multimedia learning, *The psychology of learning and motivation*, **41**, 85-139.
- 16 R.E. Mayer (2020) *Multimedia learning*, third edition, Cambridge University Press.
- 17 **B. Chiriacescu**, F.-S. Chiriacescu, C. Miron, V. Barna, C. Berlic (2019) Whiteboard animation – a way to ease the understanding of special theory for the relativity principles consequences, *In proceedings of the 14th International Conference on Virtual Learning*, Bucharest, 512-518.

- 18 **B. Chiriacescu**, F.-S. Chiriacescu, C. Miron, V. Barna (2019) Whiteboard animation – a tool for teaching the special theory of relativity, *AIP Conference Proceedings* **2218**, 060006 (2020).
- 19 **B. Chiriacescu**, F.S. Chiriacescu, C. Miron, V. Barna, C. Berlic (2021) The garage paradox presented by means of whiteboard animation, *Internațional Conference of Virtual Learning, Bucharest*.
- 20 <https://krita.org/en/> (accesat 22.12.2020).
- 21 <https://launchpad.net/kazam> (accesat 22.12.2020).
- 22 <https://www.audacityteam.org/> (accesat 22.12.2020).
- 23 <https://kdenlive.org/en/> (accesat 22.12.2020).
- 24 P.G. Hewitt (2014) *Conceptual Physics* (12th ed.), Pearson.
- 25 L. C. Epstein (1997) „Gândiți Fizica”, Ed. All Educational S.A..
- 26 L. C. Epstein (1997) „Teoria relativității în imagini”, Ed. All Educational S.A..
- 27 E. Taşlıdere, A. Eryılmaz (2009), Alternative to traditional physics instruction: effectiveness of conceptual physics approach, *Eurasian Journal of Educational Research*, **35**, Spring 2009, 109-128.
- 28 Ö. Özcan (2017) Examining the students' understanding level towards the concepts of special theory of relativity, *Problems of Education in the 21st Century* **75**(3), 263-269.
- 29 S. Sobhan, N. Yakubov, V. Kapila, M. Iskander, N. Kriftcher (2007), Modern sensing and computerized data acquisition technology in high school physics labs, *International Journal of Engineering Education*, **23**(5), 902-909.
- 30 P. Langevin (2016) *Scientia* **5**(10), 31-54.
- 31 E.F Taylor and J.A Wheeler (1992) Space time physics, *Introduction to Special Relativity*, W. H. Freeman, 2nd Edition, New York.
- 32 W. Rindler (1961) Length Contraction Paradox, *American Journal of Physics*, **29**(6), 365–366.
- 33 R. Ferraro (2007) Einstein's space-time: an introduction to special and general relativity, *Springer*.
- 34 J.R. Brown (2014) Explaining, seeing, and understanding in thought experiments, *Perspectives on Science*, **22**, 3, 357–376.
- 35 B. Crowell (2006) *Conceptual Physics*, Light and Matter Books.
- 36 F.-S. Chiriacescu , **B. Chiriacescu**, C. Miron, V. Barna (2019) Using conceptual map for a better understanding of circular motion, *AIP Conference Proceedings* **2218** (060001).
- 37 F.S. Chiriacescu, **B. Chiriacescu.**, C. Miron, V. Barna, C. Berlic (2019) Cmap Tools and Tracker used for studying the harmonic oscillator, In *Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Learning*, Bucharest, 505 – 511.
- 38 F. Chiriacescu, **B. Chiriacescu**, C. Miron, V. Barna, C. Berlic (2021) Using conceptual maps and free open-source applications for seismology studies at high school level, *Proceedings of the 16th International Conference on Virtual Learning ICVL*, 209-216.
- 39 F. Iofciu, C. Miron, S. Antohe (2010) Interactive conceptual maps part of constructivist environment for advanced physics teaching, *The 5th International Conference of Virtual Learning ICVL*.
- 40 M. Garabet, C. Miron (2010) Conceptual map – didactic method of constructivist type during the physics lessons, *Procedia Social and Behavioral Sciences* **2** 3622–3631.

- 41 [http://natrass.utk.edu/Phys250Spring2020Web/Laboratories/photoelectric effectTEST.htm](http://natrass.utk.edu/Phys250Spring2020Web/Laboratories/photoelectric%20effectTEST.htm) (accesat în 09.01.2023).
- 42 **B. Chiriacescu**, F.S. Chiriacescu, C. Miron, C. Berlic, V. Barna (2020) Arduino and Tracker video - didactic tools for study of the Kater pendulum physical experiment, *Romanian Reports in Physics* **72**(1), 901.
- 43 **B. Chiriacescu**, F.S. Chiriacescu, C. Miron (2019) GeoGebra application, used in the determination of the magnitude of an earthquake, *11th World Conference on Educational Sciences (WCES-2019)*, February 07 – 10, Milano – Venice; *New Trends and Issues Proceedings on Humanities and Social Sciences*, **6** (1) 304–312.
- 44 B. Kos, M. Grodzicki, R. Wasielewski (2018) Electronic system for the complex measurement of a Wilberforce pendulum, *European Journal of Physics*, **39**(3), 035804.
- 45 <https://www.arduino.cc/>.
- 46 K. Zachariadou, K. Yiasemides, N. Trougkakos (2012) A low-cost computer-controlled Arduino-based educational laboratory system for teaching the fundamentals of photovoltaic cells, *European Journal of Physics*, **33**(6), 1599-1610.
- 47 M. Oprea, C. Miron (2016) Didactic experiments for determining the speed of sound in the air, *Romanian Reports in Physics*, **68**(4), 1621–1640.
- 48 F. Bouquet, J. Bobroff, M. Fuchs-Gallezot, L. Maurines (2017) Project-based physics labs using low-cost open-source hardware, *American Journal of Physics*, **85**(3), 216-222.
- 49 S. Dinu, B. Dobrica, S. Voinea (2019) Educational Laboratory System Based on Electrochemical Devices, *Romanian Reports in Physics*, **71**, 905.
- 50 D. Pantazi, S. Dinu, S. Voinea (2019) The smart aquaponics greenhouse - an interdisciplinary educational laborator, *Romanian Reports in Physics*, **71**, 902.
- 51 V.L. De Jesus, C. Haubrichs, A.L. De Oliveira, D.G. Sasaki (2018) Video analysis-based estimation of bearing friction factors, *European Journal of Physics*, **39**, 025704.
- 52 J. Poonyawatpornkul, P. Wattanakasiwich (2015) High-speed video analysis of a rolling disc in three dimensions, *European Journal of Physics*, **36**, 065027.
- 53 J. Bonato, L. M. Gratton, P. Onorato, S. Oss (2017) Using high speed smartphone cameras and video analysis techniques to teach mechanical wave physics, *Physics Education*, **52**, 45017.
- 54 P. Onorato, P. Mascheretti, A. DeAmbrosis (2012) Investigating the magnetic interaction with Geomag and Tracker video analysis: Static equilibrium and anharmonic dynamics, *European Journal of Physics*, **33**(2), 385-395.
- 55 F.S. Chiriacescu, **B. Chiriacescu**, C. Miron, V. Barna, C. Berlic (2020) Arduino setup used as didactic tool for the dynamic study of torsion, *Proceedings of the 15th International Conference on Virtual Learning ICVL*; 475-480.
- 56 <https://www.originlab.com/> (accesat 07.01.2021).
- 57 <https://physlets.org/tracker/> (accesat 07.01.2021).
- 58 F.S. Chiriacescu, **B. Chiriacescu**, C. Miron, C. Berlic, V. Barna (2020) Dynamic study of torsion using Tracker software, *Romanian Reports in Physics*; **72**(3) 904.
- 59 P. M. Shearer (2009) *Introduction to Seismology* (2nd ed.) New York: Cambridge University Press.
- 60 <http://helitool.infp.ro/> (accesat la 09.01.2021).

- 61 http://www.fotonsas.ro/principiu_avertizarii_seismice.htm (accesat la 09.01.2021).
- 62 F. Chiriacescu, **B. Chiriacescu**, C.Miron (2019) Didactic instrument developed in geogebra for the determination of the coordinates of an earthquake based on an inquiry based learning method, *Proceedings of the 15th International Scientific Conference "eLearning and Software for Education"*, **1**, 481-488.
- 63 F.S. Chiriacescu, **B. Chiriacescu**, C. Miron, C. Berlic, V. Barna (2021) Acoustic resonators - a method for online study in determining the speed of sound in air, *Romanian Reports in Physics*; **73(2)** 904.
- 64 R. Gasch, J. Twele (2012) *Wind power plants, fundamentals, design, construction and operation, Second Edition*, Springer Heidelberg Dordrecht London New York.
- 65 A. Khaligh, O.C. Onar (2010) *Energy harvesting, solar, wind and ocean energy harvesting systems*, CRC Press, Taylor&Francis Group.
- 66 E. W. Golding (1995) *The generation of electricity by windpower*, Auflage; Reprint with additional material, E.&F.N. Spon Ltd., London 1976 Rieseberg, H.J.: Mühlen in Berlin (Mills in Berlin), Medusa Verlagsges., Berlin-Wien.
- 67 G. A. M. Van Kuik (2007) The Lanchester–Betz–Joukowsky limit. *Wind Energy*, **10(3)**, 289–291.
- 68 F. Thönnißen, M. Marnett, B. Roidl, W. Schröder (2016) A numerical analysis to evaluate Betz’s Law for vertical axis wind turbines, *Journal of Physics: Conference Series* **753**, 022056.
- 69 **B. Chiriacescu**, F.S. Chiriacescu, S. Voinea (2020) Virtual and experimental aerodynamic study for student’s lab, *Proceedings of the 15th International Conference on Virtual Learning ICVL*; 481-487.
- 70 **B. Chiriacescu**, F.S. Chiriacescu, S. Voinea (2021) Modelling of a vertical wind turbine in the virtual lab, *Romanian Reports in Physics* **73(1)** 901.
- 71 **B. Chiriacescu**, F.S. Chiriacescu, S., Voinea (2021) Building and testing a wind turbine experimental kit for students, *Romanian Reports in Physics* **73(3)** 905.
- 72 K.Yelda, V. Seçil, K. Ali, Y. Mehmet (2012) The levels of awareness about the renewable energy sources of university students in Turkey, *Renewable Energy*, **44**, 174e9.
- 73 I. M. Lazar, G. Panisoara, I.O. Panisoara (2020) Digital technology adoption scale in the blended learning context in higher education: Development, validation and testing of a specific tool. *PLOS ONE*, **15(7)**, e0235957.
- 74 <https://www.comsol.com/>.
- 75 J. Ma, C. Koutsougeras, H. Luo (2016) Efficiency of a vertical axis wind turbine (VAWT) with airfoil pitch control, *COMSOL Conference in Boston*.
- 76 Kwon, Hyun (2013) Use of COMSOL simulation for undergraduate fluid dynamics course. *Computers in Education Journal*. **23**.
- 77 <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview?term=1-YEAR>.
- 78 <https://www.3dcadvegra.com/solidworks-3d-cad/>.
- 79 <https://www.freecadweb.org/>.
- 80 <http://www.matbase.com/material/polymers/agrobased/polylactic-acid-pla/properties>.
- 81 M. John, S. Bettye, T. Ezra, W.A. Robert (2016) Formative evaluation of a southeast high school integrative science, technology, engineering, and mathematics (STEM) academy, *Technology in Society*, **45**:34-9.

- 82 M. Marcus, C.A. Haden, D.H. Uttal (2018) Promoting children's learning and transfer across informal science, technology, engineering, and mathematics learning experiences, *Journal of Experimental Child Psychology*, **175**: 80-95.
- 83 L. Zizka, D.M. McGunagle, P.J. Clark (2021) Sustainability in science, technology, engineering and mathematics (STEM) programs: Authentic engagement through a community-based approach, *Journal of Cleaner Production* **279**:123715.
- 84 L. Thibaut, H. Knipprath, W. Dehaene, F. Depaeppe (2018) The influence of teachers' attitudes and school context on instructional practices in integrated STEM education, *Teaching and Teacher Education*, **71**:190-205.
- 85 P. Dao (2020) Effect of interaction strategy instruction on learner engagement in peer interaction. *System*, **91**:102244.
- 86 N.M. Webb, M.L. Franke, M. Ing, J. Wong, C.H. Fernandez, N. Shin, et al. (2014) Engaging with others' mathematical ideas: Interrelationships among student participation, teachers' instructional practices, and learning, *International Journal of Educational Research*, **63**:79-93.
- 87 D. Farjon, A. Smits, J. Voogt (2018) Technology integration of pre-service teachers explained by attitudes and beliefs, competency, access, and experience, *Computers & Education*, **130**.
- 88 D. Agyei, J. Voogt (2011) Exploring the potential of the will, skill, tool model in Ghana: Predicting prospective and practicing teachers' use of technology, *Computers & Education*. **56**:91-100.
- 89 T. Teo, J. Noyes (2011) An assessment of the influence of perceived enjoyment and attitude on the intention to use technology among pre-service teachers: A structural equation modeling approach, *Computers & Education*. **57**(2):1645-53.
- 90 F.A.A. Eksail, E. Afari (2020) Factors affecting trainee teachers' intention to use technology: A structural equation modeling approach, *Education and Information Technologies*, **25**(4):2681-97.
- 91 X.A. Newton, E.P. Tonelli (2020) Building undergraduate STEM majors' capacity for delivering inquiry-based mathematics and science lessons: An exploratory evaluation study, *Studies in Educational Evaluation*, **64**:100833.
- 92 G.J. Hwang, L.Y. Chiu, C.H. Chen (2015) A contextual game-based learning approach to improving students' inquiry-based learning performance in social studies courses, *Computers & Education*, **81**:13-25.
- 93 I.O. Panisoara, I. Lazar, G. Panisoara, R. Chirca, A.S. Ursu (2020) Motivation and continuance intention towards online instruction among teachers during the COVID-19 pandemic: the mediating effect of burnout and technostress, *International journal of environmental research and public health*, **17**(21):8002.
- 94 E. Bettinger (2010) *To be or not to be: Major choices in budding scientists*. American Universities in a global market, National Bureau of Economic Research, Inc p. 69-98.
- 95 A. Krapp, M. Prenzel (2011) Research on Interest in science: Theories, methods, and findings, *International Journal of Science Education*, **33**(1):27-50.
- 96 E. Alake-Tuenter, H.J.A. Biemans, H. Tobi, M. Mulder (2013) Inquiry-based science teaching competence of primary school teachers: A Delphi study, *Teaching and Teacher Education*, **35**:13-24.

- 97 I. Buric, L.E. Kim (2020) Teacher self-efficacy, instructional quality, and student motivational beliefs: An analysis using multilevel structural equation modeling, *Learning and Instruction*, **66**(101302).
- 98 F. D. Davis (1989) Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology, *MIS Quarterly*, **13**(3):319-340.
- 99 V. Venkatesh, M. Morris, G. Davis, F. Davis (2003) User acceptance of information technology: toward a unified view, *MIS Quarterly*, **27**(3):425-478.
- 100 M. Gawrycka, J. Kujawska, M.T. Tomczak (2021) Self-assessment of competencies of students and graduates participating in didactic projects – Case study, *International Review of Economics Education*, **36**:100204.
- 101 M. Blok, E.J.V. Ingen, A. de Boer, M.W. Slotman (2020) ICT as an instrument for social and emotional ageing. A qualitative study with older adults with cognitive impairments, *Tijdschrift voor gerontologie en geriatrie*. **51**(3):1-12.
- 102 F. Davis, R. Bagozzi, P. Warshaw (2006) Extrinsic and intrinsic motivation to use computers in the workplace, *Journal of Applied Social Psychology*, **22**:1111-32.
- 103 D.A. Adams, R.R. Nelson, P.A. Todd (1992) Perceived usefulness, ease of use, and usage of information technology: A Replication, *MIS Quarterly*, **16**(2):227-247.
- 104 Y. Huang (2014) Empirical analysis on factors impacting mobile learning acceptance in higher engineering education [PhD thesis]: University of Tennessee.
- 105 F. Korur, R. Vargas, N.T. Serrano (2016) Attitude toward science teaching of Spanish and Turkish in-service elementary teachers: multi-group confirmatory factor analysis, *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, **2**(2):303-20.
- 106 D. Albarracin, A. Sunderrajan, S. Lohmann, M-PS Chan, D. Jiang (2018) The psychology of attitudes, motivation, and persuasion, In: Albarracin D, Johnson B, editors. *Handbook of Attitudes*. New York: Routledge.
- 107 F. Baltar, I. Brunet, (2012) Social Research 2.0: Virtual snowball sampling method using Facebook, *Internet Research*, **22**(1):57-74.
- 108 A. Shaghghi, R.S. Bhopal, A. Sheikh (2011) Approaches to recruiting 'hard-to-reach' populations into re-search: a review of the literature, *Health Promot Perspect*, **1**(2):86-94.
- 109 D. Maison, D. Jaworska, D. Adamczyk, D. Affeltowicz (2021) The challenges arising from the COVID-19 pandemic and the way people deal with them. A qualitative longitudinal study, *PLOS ONE*, **16**(10):e0258133.
- 110 Y. Zhao, J. Watterston (2021) The changes we need: Education post COVID-19, *Journal of Educational Change*, **22**(1):3-12.
- 111 B.B. Lockee (2021) Online education in the post-COVID era, *Nature Electronics*, **4**(1):5-6.
- 112 A. Kozłowski, A. Kaliszewski, J. Dąbrowski, H. Klimek (2021) Virtual network sampling method using LinkedIn. *MethodsX*, **8**:101393.
- 113 L. Sugiura, R. Wiles, C. Pope (2017) Ethical challenges in online research: Public/private perceptions, *Research Ethics*, **13**(3-4):184-99.
- 114 A. Blümle, J.J. Meerpohl, M. Schumacher, E. von Elm (2014) Fate of clinical research studies after ethical approval – Follow-up of study protocols until publication, *PLOS ONE*, **9**(2):e87184.

- 115 S. Hokke, N.J. Hackworth, N. Quin, S.K. Bennetts, H.Y. Win, J.M. Nicholson, et al. (2018) Ethical issues in using the internet to engage participants in family and child research: A scoping review, *PLOS ONE*, **13**(9):e0204572.
- 116 F. Vahidnia, B. Ghonsooly, H. Shahriari (2021) Development and validation of students' attitudes towards teacher's pet phenomenon scale in the higher education setting: Differences by levels of study and Grade-Point-Average, *Studies in Educational Evaluation*, **70**:101000.
- 117 H.H. Chuang, C.Y. Weng, F.C. Huang (2015) A structure equation model among factors of teachers' technology integration practice and their TPCK, *Computers & Education*, **86**:182-91.
- 118 B. Thompson (2004) Exploratory and confirmatory factor analysis: Understanding concepts and applications, Washington, DC, US: *American Psychological Association*, 10694(000).
- 119 Y.K. Türel (2011) An interactive whiteboard student survey: Development, validity and reliability, *Computers & Education*, **57**(4):2441-50.
- 120 S.G. Piland, R.W. Motl, M.S. Ferrara, C.L. Peterson (2003) Evidence for the factorial and construct validity of a self-report concussion symptoms scale. *Journal of Athletic Training*, **38**(2):104-12.
- 121 A.L. Comrey, H.B. Lee (1992) *A first course in factor analysis*, 2nd ed. Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates, Inc..
- 122 B.G. Tabachnick, L.S. Fidell (2019) *Using multivariate statistics. 7th Edition ed*, Pearson.
- 123 J. Osborne, A.B. Costello (2004) Sample size and subject to item ratio in principal components analysis, *Prac Assess Res Eval*, **9**(1):11.
- 124 I. O. Panisoara, R. Chirca, I. Lazar (2020) The effects of online teaching on students' academic progress in stem, *Journal of Baltic Science Education*, **19**(6A):1106-24.
- 125 A. Malureanu, G. Panisoara, I. Lazar (2021) The relationship between self-confidence, self-efficacy, grit, usefulness, and ease of use of elearning platforms in corporate training during the COVID-19 pandemic, *Sustainability*, **13**(12):6633.
- 126 J. Hair, G.T.M. Hult, C. Ringle, M. Sarstedt (2016) *A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)*, 2nd edition, SAGE Publications, Inc..
- 127 J. Hair, C. Hollingsworth, A. Randolph, A. Chong (2017) An updated and expanded assessment of PLS-SEM in information systems research, *Industrial Management & Data Systems*, **117**:442-58.
- 128 J. Cohen (1988) *Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2nd ed*. Routledge.
- 129 A. Khaliq, A. Waqas, Q.A. Nisar, S. Haider, Z. Asghar (2022) Application of AI and robotics in hospitality sector: A resource gain and resource loss perspective, *Technology in Society*, **68**:101807.
- 130 B. Yáñez-Araque, J.P. Sánchez-Infante Hernández, S. Gutiérrez-Broncano, P. Jiménez-Estévez (2021) Corporate social responsibility in micro-, small- and medium-sized enterprises: Multigroup analysis of family vs. nonfamily firms, *Journal of Business Research*, **124**:581-92.
- 131 <https://analyze.intellectusstatistics.com/> ISOcsIS.

- 132 A. Field (2017) *Discovering statistics using IBM SPSS statistics: North American edition*, Sage Publications.
- 133 I. Lazar, G. Panisoara, I.O. Panisoara (2020) Adoption of digital storytelling tool in natural sciences and technology education by pre-service teachers using the technology acceptance model, *Journal of Baltic Science Education*, **19**:429-53.
- 134 C.L. Miltgen, H.J. Smith (2015) Exploring information privacy regulation, risks, trust, and behavior, *Information & Management*, **52**(6):741-59.
- 135 P. Ruiz-Palomino, B. Yáñez-Araque, P. Jiménez-Estévez, S. Gutiérrez-Broncano (2022) Can servant leadership prevent hotel employee depression during the COVID-19 pandemic? A mediating and multigroup analysis, *Technological Forecasting and Social Change*, **174**:121192.
- 136 G. Sabogal-Alfaro, M.A. Mejía-Perdigón, A. Cataldo, K. Carvajal (2021) Determinants of the intention to use non-medical insertable digital devices: The case of Chile and Colombia, *Telematics and Informatics*, **60**:101576.
- 137 X. He, T. Li, O. Turel, Y. Kuang, H. Zhao, Q. He (2021) The impact of STEM education on mathematical development in children aged 5-6 years, *International Journal of Educational Research*, **109**:101795.
- 138 M. Drent, M. Meelissen (2008) Which factors obstruct or stimulate teacher educators to use ICT innovatively? *Computers & Education*, **51**(1):187-99.
- 139 P. Ertmer, A. Ottenbreit-Leftwich, O. Sadik, E. Sendurur, P. Sendurur (2012) Teacher beliefs and technology integration practices: A critical relationship, *Computers & Education*, **59**:423-35.
- 140 J. Tondeur, J. van Braak, S. Guoyuan, J. Voogt, P. Fisser, A. Ottenbreit-Leftwich (2012) Preparing pre-service teachers to integrate technology in education: A synthesis of qualitative evidence, *Computers & Education*, **59**(1):134-44.
- 141 M. Millar, A. Tesser (1986) Effects of affective and cognitive focus on the attitude-behavior relation, *Journal of Personality and Social Psychology*, **51**:270-6.
- 142 M.A. Peláez-Fernández, S. Mérida-López, N. Sánchez-Álvarez, N. Extremera (2021) Managing teachers' job attitudes: the potential benefits of being a happy and emotional intelligent teacher, *Frontiers in psychology*, **12**:661151.
- 143 V. Singh, S.K. Sharma (2016) Analyzing the moderating effects of respondent type and experience on the fuel efficiency improvement in air transport using structural equation modeling, *European Transport Research Review*, **8**(2):12.